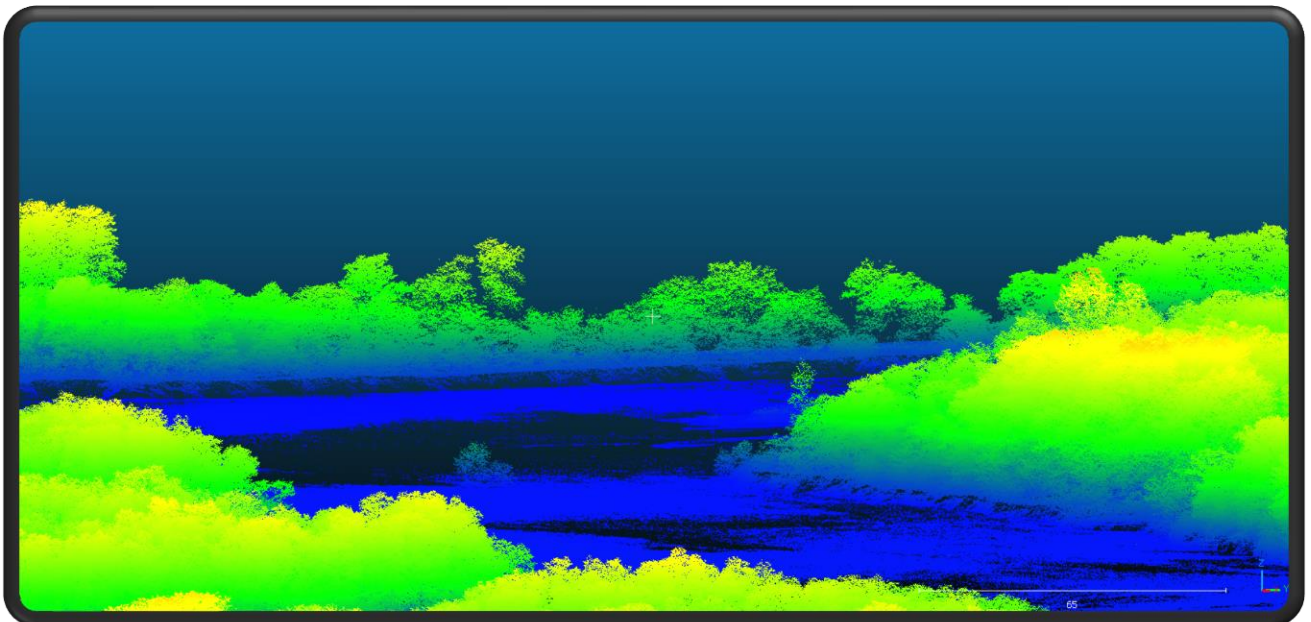


Projet de Fin d'Études (PFE) 2022-2023

Caractérisation de l'évolution de la végétation arborée alluviale de la Loire moyenne entre 2003 et 2020



Sous la direction de Alex ANDREAULT

Mathias MOISON – Cédric DEBRABANT

Etude des dynamiques de végétation forestière

Caractérisation de l'évolution de la végétation arborée alluviale de la Loire moyenne entre 2003 et 2020

Alex ANDREAULT

2023

Mathias MOISON – Cédric DEBRABANT

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non-plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre plus grande gratitude à notre tuteur de PFE Mr Andréault, qui est resté très accessible tout au long de cette encadrement de projet de fin d'étude. Son aide a été très précieuse et toujours très présente malgré le lourd travail de sa thèse. Ses enseignements et conseils quant à l'utilisation des logiciels tels que CloudCompare, ou Rstudio se sont avérés extrêmement utiles, tout autant que son aide concernant la compréhension et l'utilisation des données LiDAR à disposition.

Merci également à Mr Bouamoud, pour son aide quant à l'accès aux données LiDAR. Son accessibilité à distance comme en présentiel a permis un accès facile aux données, depuis n'importe quelle location. Sans son aide, le projet aurait été beaucoup plus difficile à réaliser.

Merci également à Pierrick Louet, pour son aide à l'apprentissage et la compréhension du codage en langage R sur Rstudio. Nous sommes également très reconnaissants de nous avoir transmis des scripts ayant été utilisé précédemment sur des projets similaires. Ceux-ci nous ont été d'une grande aide, d'autant que nous n'avions aucune connaissance préalable du langage R au début de ce Projet de Fin d'Etude.

SOMMAIRE

Table des matières

1. Introduction.....	7
2. Matériel et Méthode.....	8
2.1 Station d'étude	8
2.2 Présentation des données	10
2.3 Pré-traitement des données LiDAR	10
2.3.1 Filtrage des points doublés	10
2.3.2 Normalisation topographique de la végétation	10
2.4 Traitement des données	11
2.4.1 Filtrage de la strate arborée.....	11
2.5 Rasterisation.....	12
2.5.1 Définition	12
2.5.2 Etude de résolution	13
2.5.3 Rastérisation	13
2.6 Etude des trouées	14
2.6.1 Digitalisation des trouées	14
2.6.2 Application des métriques	14
3. Résultats.....	19
3.1 Résultat des métriques	19
3.1.1 Surface brute de végétation	19
3.1.2 Nombre de trouées	19
3.1.3 Surface des trouées	19
3.1.4 Occupation des trouées.....	21
3.1.5 Evolution des trouées	21
4 Analyse et discussion	22
4.1 Analyse quantitative	22
4.2 Analyse qualitative des évolutions des trouées	23
4.2.1 Analyse des résultats de la métrique d'occupation du sol.....	23
4.2.2 Analyse des résultats de la métrique d'Etat des trouées.....	24
4.3 Analyse spatiale des dynamiques d'évolution	27
4.4 Réponses aux hypothèses.....	29
4.5 Critiques et points d'amélioration.....	30
5 Conclusion	31
Bibliographie et Sitographie	33
Annexes.....	36

Dynamique d'évolution de la végétation dans la plaine alluviale

Cédric Debrabant & Mathias Moison

ARTICLE INFO

Mots clés :

Végétation

Mortalité

Trouée

LiDAR

Dynamique

Strate arborée

Plaine alluviale

Loire

RESUME

La végétation alluviale joue un rôle crucial dans les écosystèmes fluviaux, faces à de nouvelles perturbations, des dynamiques d'évolution s'opèrent dans ce milieu. En se concentrant sur une station de la Loire, l'utilisation de donnée multi-temporelle de LiDAR aéroporté et de l'analyse des trouées de canopée révèle des tendances pertinentes. Entre 2003 et 2020, le nombre de trouées diminue, mais leur taille augmente. Bien que la végétation alluviale globale augmente, certaines trouées persistent sans montrer de signes de fermeture. À l'exception d'un secteur confronté à des pressions anthropiques directe, l'analyse spatiale de la station d'étude a pu démontrer unanimement des tendances à la fermeture des trouées. Des corrélations ont pu être émises entre le phénomène d'incision et les dynamiques de la strate arborée. Néanmoins, davantage de recherches doivent être entreprises pour établir des liens de causalités entre le changement climatique et la végétation arborée.

En conclusion, bien que le LiDAR soit révolutionnaire, une temporalité plus courte pour les acquisitions multi-temporelles et l'utilisation de données terrain peuvent améliorer la compréhension des évolutions de la végétation alluviale.

1. Introduction

Les dynamiques d'évolution de la végétation dans la plaine alluviale sont des processus complexes et souvent méconnus des communautés scientifiques. De nombreuses études sont entreprises sur les forêts tropicales, notamment la forêt d'Amazonie (**Hunter et al, 2015 ; Dalagnol et al, 2019**). Néanmoins, dans la bibliographie internationale, la plaine alluviale demeure une entité dépourvue d'études ciblant spécifiquement les dynamiques d'évolution de sa végétation.

Des processus abiotiques induit par l'Homme, s'exercent pourtant sur ce milieu et nécessitent d'autant plus des recherches pour comprendre et analyser la réactivité du système alluviale face à ces pressions. Le réchauffement climatique et l'incision des cours d'eau jouent un rôle déterminant sur le

comportement de la nappe alluviale. L'intensification des étiages et l'abaissement de la ligne d'eau participent respectivement à la diminution et à l'inaccessibilité de la ressource en eau pour la communauté de ligneux. Dans le lit majeur, les déficits en eau sont une des sources de mortalité chez les espèces (**Rifai et al., 2016**) et peuvent conduire à la formation de trouées, identifiables depuis la canopée un vue aérienne. De manière plus générale, les dynamiques des forêts sont caractérisées par les tailles et distributions des trouées de canopée (**Kellner et al., 2009**).

L'apparition de l'outil LiDAR sur le marché introduit pour les chercheurs une nouvelle opportunité d'acquérir efficacement des données numériques de la canopée. La capacité du LiDAR à créer densément des

nuages de points tridimensionnels de la végétation lisse permet l'enregistrement de base de données sur de grandes surfaces.

Dans ce contexte, cette recherche met en avant le potentiel du LiDAR aéroporté pour étudier les changements de la strate arborée et répond à la question scientifique suivante : « quelles sont les dynamiques d'évolution de la végétation arborée dans la plaine alluviale de la Loire entre 2003 et 2020 ? »

Afin de comprendre correctement les résultats de ce travail, il est nécessaire de définir en amont le terme « trouée », étant donné qu'il est susceptible d'être employé différemment dans la bibliographie. Par exemple, les recherches de **Hunter et al, (2015)** en Amazonie brésilienne définissent une « trouée » par une ouverture verticale d'une surface minimale de dix mètres carrés. Tandis que **Brokaw (1982)**, les définit comme des ouvertures verticales dans la canopée s'étendant sur tous les niveaux jusqu'à une hauteur moyenne de deux mètres au-dessus du sol et d'une surface supérieure à 36 mètres carré.

Au vu des données et en comparant les trouées de la strate arborée sur les ortho photos de la station, il est préférable de retenir la définition de **Hunter et al (2015)**. Par conséquent, le traitement effectué définit uniquement une « trouée » si sa surface d'ouverture est supérieure à 10 mètres carré. De plus, l'objet de cette étude s'intéresse uniquement aux dynamiques d'évolution de la strate arborée, c'est-à-dire, la végétation supérieure à cinq mètres. Or, la définition de **Brokaw (1992)** se base sur une hauteur minimale de deux mètres de haut, inférieur à la strate arborée comprenant alors la strate arbustive qui n'est pas l'objectif de cette étude. Ainsi, pour cette recherche, il est choisi de définir les « trouées » par une ouverture verticale s'étendant jusqu'à une hauteur minimale de 5 mètres au-dessus du sol avec une surface supérieure à 10 mètres carré, le tout entouré d'une strate arborée.

À travers cette étude, il s'agira d'analyser quantitativement et qualitativement la végétation arborée entre deux années sur une station choisie au préalable. Les hypothèses sont les suivantes :

H0 : Le nombre de trouées n'augmente pas entre 2003 et 2020

H1 : Le nombre de trouées a augmenté entre 2003 et 2020

La station d'étude retenue se situe en France, le long de la Loire au niveau du hameau de Bois Gibault dans le département de Tracy-sur-Loire (58150) à 45 kilomètres en aval de la ville de Nevers. La superficie de la station est de 244 hectares et comprend les deux rives, des barres sédimentaires et des îles végétalisées.

2. Matériel et Méthode

2.1 Station d'étude

La station a pour objectif d'être représentative des caractéristiques rencontrées sur le linéaire de la Loire. La sélection de l'emplacement est déterminée autour de trois critères principaux : l'hydromorphologie, l'absence d'urbanisation et la présence d'une plaine alluviale étendue.

Dans un premier temps, les caractéristiques hydromorphologiques recherchés doivent comprendre préférentiellement des chenaux multiples, des îles végétalisées, des barres sédimentaires et des méandres. Les singularités de la station sont observables sur la figure 1.

Le second critère consiste à repérer un site épargné le plus possible de l'urbanisation. Autrement dit, une station où les aménagements sont absents dans le lit mineur et majeur de la Loire. Sur le raster de « Google Satellite », aucun quai, épi, seuil, duit ni pont ne sont apercevables. En vérifiant les données sur « géoportail.gouv.fr », les ortho photos

historiques datant de 1950 ne dévoilent pas la présence d'ouvrage déconstruit par le passé. Toutefois, des traces d'anciennes extractions de granulats sont identifiables dans le lit majeur. Les photos d'archives permettent d'estimer le début des travaux d'extraction, soit en 1975 pour la gravière de gauche, puis, en 1988 pour la gravière de droite. Également, une ligne de train est aménagée en rive droite. Actuellement, les premiers ouvrages à proximité du site sont le pont à Saint-Thibault (18300), 3 kilomètres en aval et le pont à Pouilly-sur-Loire (58150), 7 kilomètres en amont.

Enfin, la station témoin, au nord-est, en rive droite, la présence d'une zone de végétation alluviale préservée des perturbations anthropiques. La végétation aux abords des gravières n'est pas considérée comme intacte étant donné les pressions qui ont pu être exercées lors des travaux d'extraction au 20^{ème} siècle.

La station de Bois Gibault réunit l'ensemble des critères recherchés. De ce fait, elle peut être utilisée en tant que station de référence pour de futures études portant sur la végétation alluviale de la Loire. La surface brute mesure 244 hectares, or, en soustrayant l'air du chenal, la superficie réelle de l'étude de la végétation est de 143,3 hectares. De plus, dû à des soucis de normalisation de la donnée expliqués dans la partie « normalisation topographique de la végétation », il a été choisi de découper la station en trois entités. Chacune de ces entités, c'est-à-dire, la rive droite, la rive gauche et l'île végétalisée sont délimitées pour comprendre uniquement les données correctement normalisées.

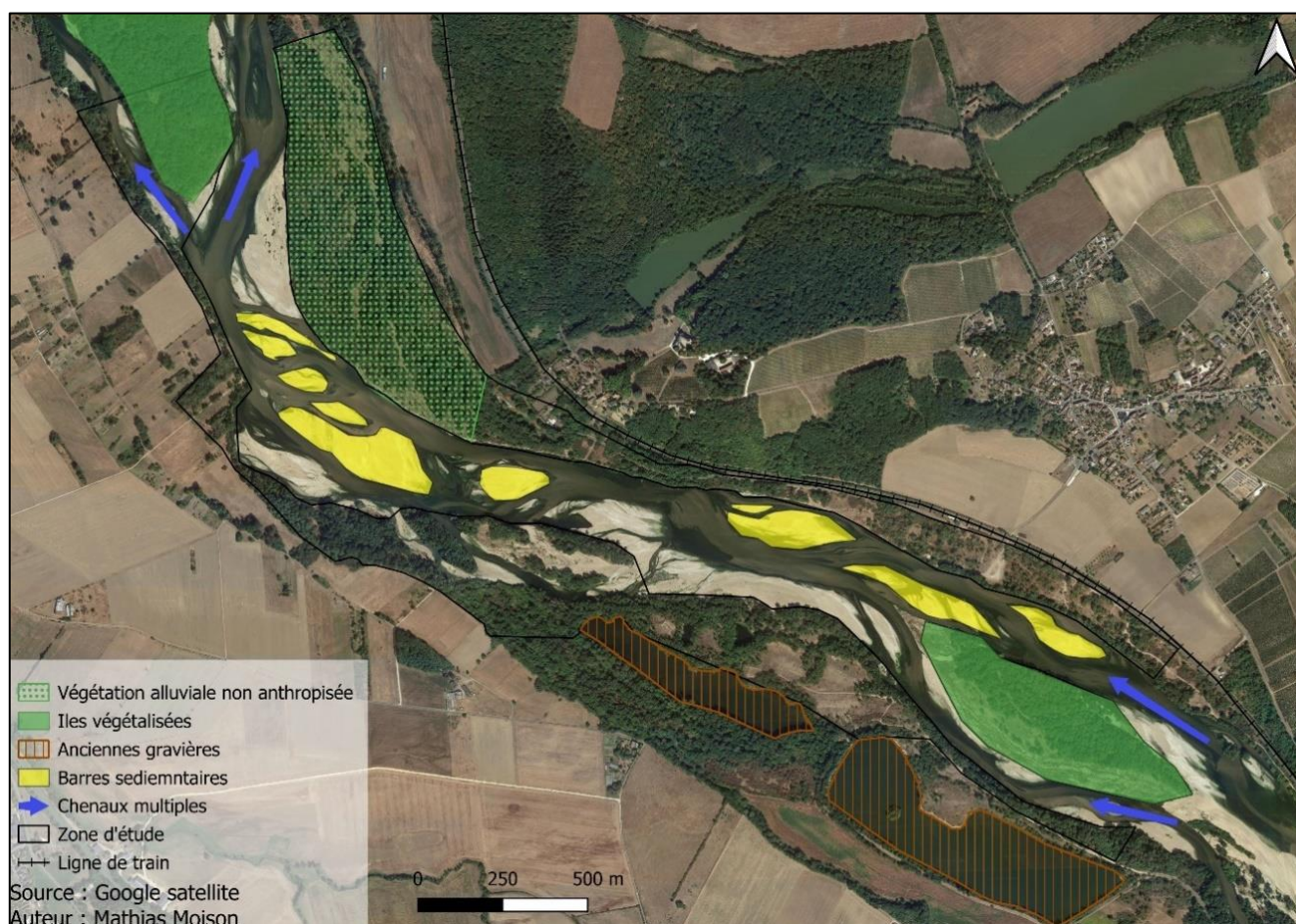


Figure 1 : Caractéristiques de la station Bois Gibault - Tracy-sur-Loire (58150)

2.2 Présentation des données

Deux jeux de données sont mis à profit dans cette analyse, tous deux proviennent d'une acquisition d'un LiDAR aéroporté. Cependant, 17 ans séparent chacune des levées de nuages de points. De ce fait, le matériel employé n'est pas le même et n'a pas la même précision entre les deux années. Ainsi, chaque base de données a ses caractéristiques propres à sa période d'enregistrement.

L'acquisition 2003 est effectuée par un LiDAR avec une résolution plus faible comparée à celle de 2020. Par conséquent, les données numériques de canopée sont moins précises mais moins lourde à traiter. À contrario, les données de 2020 sont plus précises mais requièrent une puissance plus importante de traitement. À titre d'exemple, pour la station de Bois Gibault, le fichier « las » de 2003 correspond à une taille de 7640 kilos octets tandis que celui de 2020 représente 35154 kilos octets. Ces caractéristiques sont à prendre en compte lors de la méthodologie de traitement.

L'utilisation de plusieurs jeux de données d'un même site d'étude à différentes temporalités est très importante pour l'étude : on parle d'acquisition multi-temporelles. Ce type d'acquisition permet alors d'analyser les évolutions et dynamiques des trouées (**Dalagnol et al., 2021**).

2.3 Pré-traitement des données LiDAR

Les données brutes LiDAR récupérées n'ont pas été directement prêtes à être traitées pour le projet, et ont d'abord dû être filtrées et normalisées afin de pouvoir être étudiées.

2.3.1 Filtrage des points doublés

La première étape du pré-traitement des données LiDAR est le filtrage des points doublés. Il s'agit d'une erreur de données

fréquente, lors de laquelle chaque point est doublé, c'est-à-dire que deux points se situent aux exactes mêmes coordonnées spatiales et ont les mêmes attributs. Pour d'abord vérifier si les deux couches de points possèdent des points doublés, une méthode par codage sur Rstudio a été choisie. Pour se faire, la fonction « las_check » du package « LiDAR » est exécutée sur les deux couches, renvoyant de nombreuses informations sur celles-ci, dont la présence ou non de points doublés. Après lecture des résultats, il s'est avéré que de nombreux points étaient doublés sur les deux couches. Afin de les supprimer, la fonction « filter_duplicates » du même package a été exécutée sur les deux couches.

2.3.2 Normalisation topographique de la végétation

Le processus de normalisation des hauteurs de chaque ensemble de points vise à éliminer la topographie afin d'aligner toute la végétation sur une hauteur de base uniforme. En effet, une des étapes suivantes est la séparation des nuages de points différentes strates par rapport à des hauteurs limite définies. Sans cette étape, ces limites en amont de la zone d'étude ne seraient pas applicables à des zones plus en aval par exemple en raison de la diminution de la topographie.

Pour l'année 2020, le processus a été réalisé en codage sur Rstudio, en utilisant la fonction "normalize_height" avec l'algorithme "tin". Cet algorithme exploite les points marqués comme "sol" dans le nuage de points pour évaluer la hauteur de base de chaque point noté « végétation », permettant ainsi d'homogénéiser toutes les hauteurs des points de végétation à cette valeur de base commune.

Cependant, pour l'année 2003, les points marqués « sol » n'étaient pas présents dans le nuage de points, celui-ci ne contenant que des points de végétation. Des dalles de modèle numérique de terrain (DMT) de 2003 ont alors été récupérées dans les zones

d'étude, puis fusionnées sur le logiciel CloudCompare, et enfin rastérisées sur le logiciel ArcGIS Pro. Concernant la rastérisation, celle-ci a été réalisée avec une résolution de 5m en raison du faible nombre de points en 2003, évitant ainsi de nombreux trous. Le DTM raster ainsi obtenu a été intégré dans le code R, suivi de l'application

de l'algorithme de normalisation aux données de végétation de 2003 en utilisant le DTM créé.

La différence entre les données normalisées et non normalisées peut ensuite être illustrée le long d'un transect (ici réalisé avec les valeurs de 2020) :

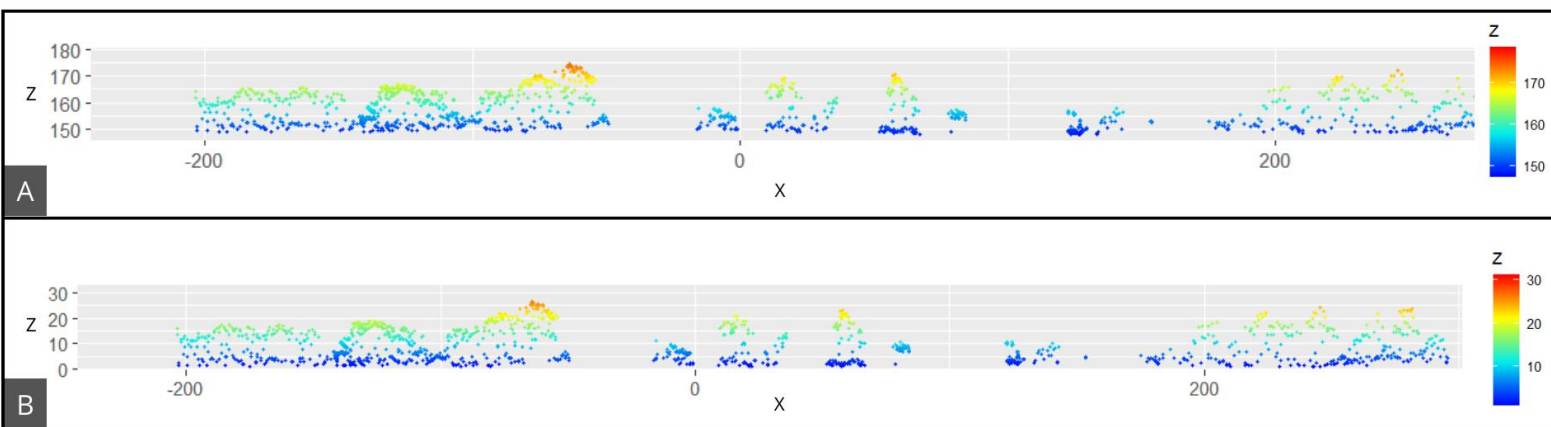


Figure 2: Transect de végétation avant (A) et après (B) la normalisation des hauteurs de végétation pour les données de 2020

Il est donc remarqué que les points de végétation ont une valeur Z variant entre 150 et 180 mètres avant normalisation, car leur position Z est représentée par leur altitude. On observe ainsi que ces points ont une valeur Z variant entre 0 et 30 mètres après la normalisation, cette valeur Z représente alors dorénavant la hauteur normalisée de la végétation par rapport au sol.

Il est important de noter que certaines parties de la station présentent toujours des valeurs d'altitude négatives malgré la normalisation, en particulier dans la partie Est de la station et dans des zones aquatiques. Ces valeurs négatives peuvent résulter de points de végétation situés sous le DTM, tels que des zones immergées ou des crevasses non représentées dans le DTM. Également, le DTM utilisé ne couvre pas l'ensemble du site d'étude : deux zones ne présentent pas de données. Ces deux problèmes font partie des raisons pour lesquelles le site d'étude a été divisé en trois zones d'études (voir partie 2.1), afin d'éviter ces zones avec des données

manquantes, ou contenant des données incohérentes.

2.4 Traitement des données

2.4.1 Filtrage de la strate arborée

2.4.1.1 Définition des strates

Après filtrage et normalisation des données de végétation LiDAR pour 2003 et 2020, le traitement de ces données peut commencer. Étant donné que l'étude du projet porte sur l'étude de la végétation arborée alluviale de la Loire, il est d'abord nécessaire d'extraire les différentes strates de végétation (herbacée, arbustive et arborée) des deux nuages de points. Pour cela, une approche de définition des strates selon leur hauteurs limite est choisie.

Pour définir les hauteurs limites des strates de végétation, il existe de nombreuses définitions différentes, dépendant notamment des pays, dont la végétation peut être plus élevée ou plus basse, entraînant des limites différentes. Toutefois, une définition

de référence établie par la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) en 2020 pour définir une forêt en Europe, notamment en termes de limite de hauteur, est devenue une référence pour caractériser les strates en Europe (Ertel et al., 2023 ; Eg, 2023). Les données sont alors filtrées selon les limites suivantes :

- Strate arborée : végétation dont la hauteur dépasse 5 mètres par rapport au sol.
- Strate arbustive : végétation dont la hauteur est comprise entre 1.5 et 5 mètres au-dessus du sol.
- Strate herbacée : végétation dont la hauteur ne dépasse pas 1.5 mètres au-dessus du sol.

2.4.1.2 Filtrage

Concernant le filtrage, celui-ci est réalisé par codage sur Rstudio. Les points de chaque strate sont alors sélectionnés au sein du nuage de point de végétation selon les critères de hauteur ci-dessus, puis exportés en une couche indépendante. Le processus est alors exécuté pour les deux nuages de points (2003 et 2020), permettant la création de six couches de végétation, soit 3 couches de strate par année.

2.5 Rasterisation

2.5.1 Définition

Une fois le filtrage des strates effectué, l'étude peut continuer vers la phase

suivante, qui consiste à rasteriser les 6 couches de végétation générées. Ces couches demeurent sous la forme de nuages de points au format "LAS", et il est donc impératif de les convertir en format Raster pour la poursuite de l'étude.

Il est important de rappeler que le format Vecteur englobe des couches de données sous forme géométrique, comprenant des polygones, des lignes, ou encore des points tels que les nuages de points de l'étude. Chaque entité géométrique renferme un ensemble d'informations en fonction des différents champs de la table attributaire de la couche. En revanche, le format Raster se compose de pixels, chacun contenant une information unique. Sa résolution, définie comme la taille fixe de tous les pixels, caractérise ce format. La conversion des couches en format Raster est obligatoire, permettant la création de couches indiquant la présence de végétation par un pixel. Cette conversion est indispensable pour obtenir une visualisation pertinente des différentes strates de végétation. Et est essentielle pour mener des études spatiales, en particulier pour examiner les trouées de végétation.

La rasterisation des couches consiste alors en l'application d'algorithmes qui génèrent des pixels dans un système de grille, où chaque cellule possède une taille prédéfinie commune (résolution du raster). Cela se fait lorsque des points de végétation sont détectés dans la cellule respective (voir figure 3).

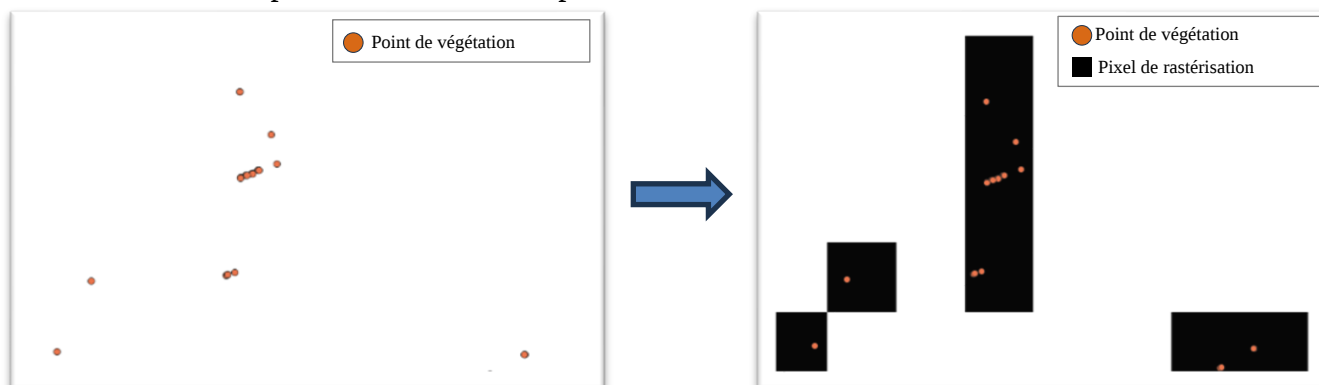


Figure 3: Exemple de rasterisation d'un nuage de points

2.5.2 Etude de résolution

La première étape de la rastérisation des couches consiste à définir la résolution souhaitée pour les couches raster, ce qui requiert la réalisation d'une étude de résolution. Étant donné les limitations de l'outil LiDAR utilisé en 2003, moins performant, les données de cette année sont considérées comme limitantes en termes de précision, et c'est sur ces données que l'étude de résolution est effectuée. Le choix de la résolution est très important pour le projet, car la résolution sélectionnée déterminera la précision de toutes les couches raster générées ultérieurement.

Étant donné qu'une analyse des trous de végétation est appliquée au cours du projet, une résolution trop élevée entraînerait la création de pixels trop grands, pouvant entraîner une perte d'informations sur de petits trous de végétation. À l'inverse, la rastérisation des couches de végétation avec une résolution trop fine pourrait engendrer la présence de trous de végétation artificiels, qui n'existent pas réellement. Ainsi, le choix de la résolution nécessite un équilibre délicat pour garantir la précision nécessaire tout en évitant la distorsion des caractéristiques de la végétation.

Pour estimer cette résolution, un calcul est effectué sur le logiciel CloudCompare avec l'outil « Neighborhood » pour chaque point du nuage de points, déterminant le nombre de points « voisins » à celui-ci, c'est-à-dire le nombre de points contenus dans une sphère d'une taille définie, centrée sur le point étudié. Étant donné le caractère chaotique du nuage de points, une petite zone représentative est sélectionnée pour ne pas travailler avec l'ensemble du nuage. L'opération est alors effectuée pour différentes tailles de cercle de voisinage, et des graphiques de visualisation du nombre de voisins de chaque point sont créés (voir figure 4).

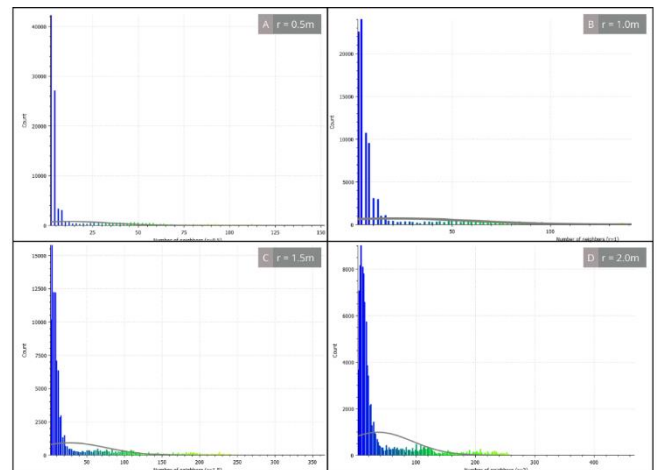


Figure 4: Nombres de voisins de chaque point du nuage de 2003 selon les sphères de rayon 0.5m (A), 1.0m (B), 1.5m (C) et 2.0m (D).

La détermination de la résolution est alors choisie en prenant en compte plusieurs critères : une analyse de graphiques de voisinage (voir figure 4) permettant de déterminer la résolution pour laquelle le nombre de points sans voisins est le plus pertinent, le critère de facilité de calcul pour la suite du projet (des rastérisation et calculs sur des raster avec une résolution fine entraîne des temps de calcul beaucoup plus long) ainsi que la pertinence de surface de la recherche de trous de végétation d'une surface minimale définie par la résolution.

Après réalisation de l'étude de résolution, c'est donc une résolution de **deux mètres** qui est choisie pour l'ensemble des rasters du projet.

2.5.3 Rastérisation

Après définition de la résolution des rasters, la rastérisation est effectuée. Le processus de rastérisation comprend donc l'utilisation de l'outil de conversion « rastériser » du logiciel Qgis, en appliquant une résolution de 2.0 mètres. Le processus est effectué pour les 6 couches de végétation créées précédemment, soit les trois strates de végétation de la zone d'étude de 2003 et celles de 2020.

2.6 Etude des trouées

2.6.1 Digitalisation des trouées

Concernant l'identification des trouées, plusieurs méthodes existent. La méthode retenue est celle de l'application de coupes transversales à un seuil de hauteur défini (**Espirito-Santo et al., 2014 ; Koukoulas & Blackburn, 2004**). Dans le cas de cette étude, ce sont les dynamiques de la végétation arborée qui sont étudiées. Le seuil d'identification des trouées correspond alors au seuil de limite de définition de la strate arborée : 5m au-dessus du sol.

Les étapes de la digitalisation consistent à obtenir une couche vecteur pour chaque année contenant l'ensemble des trouées sur la zone d'étude. Le traitement doit être fait rigoureusement pour ne pas biaiser les futures interprétations. Dans la suite de ce travail, les opérations de traitement sont uniquement appliquées à la strate arborée étant donné qu'elle constitue l'objet de cette étude. Les rasters de la strate arbustive et arborée seront utilisés plus tard dans la partie « occupation des trouées ».

L'acquisition LiDAR a enregistré les sommets de la strate arborée, par conséquent la présence de végétation est marquée par un pixel alors qu'une trouée est représentée par l'absence de pixel. Afin de simplifier les opérations géomatiques, il a été choisi de passer le raster de la strate arborée en un format vecteur, plus facile pour renseigner des informations dans la table d'attributs. Cette conversion se fait rapidement sur Qgis avec l'outil : « pixel de raster en polygone ». Par la suite, pour créer spécifiquement une couche dédiée aux trouées, il faut soustraire la surface de la strate arborée à un polygone plein (cf. annexe 2). Pour créer cette couche, une différence classique de polygone est réalisée avec comme couche source la « zone d'étude ». La couche vecteur de la « zone d'étude » délimite l'air d'analyse pour les trois entités (cf. figure 1). La couche obtenue

correspond à l'ensemble des surfaces dépourvue d'une végétation supérieure à 5 mètres du sol. De manière à renseigner les caractéristiques de chaque trouée, il est nécessaire de créer des entités uniques propres à chaque polygone. L'outil « morceaux multiples vers morceaux uniques » sur Qgis permet d'exécuter cette opération. Le processus est réalisé pour les strates arborées des deux années.

Dans un second temps, un filtrage est nécessaire étant donné que tous les polygones créés ne correspondent pas forcément à des trouées (cf. annexe 2). Ces éléments sont vérifiés à partir des ortho photos. Dans le cas où le polygone formé ne recouvre pas un espace propice aux développements de ligneux, par exemples, un petit étang, un champ agricole ou un chemin régulièrement emprunté alors le polygone est supprimé. Cette deuxième étape de filtrage est plus chronophage puisqu'elle n'est pas automatisée.

Enfin, pour appliquer minutieusement la définition d'une trouée défini dans l'introduction, un dernier filtre est opéré sur Qgis. Seulement les trouées avec une surface supérieures à 10 mètres carré sont conservées. Une fois ce filtrage finalisé, les métriques peuvent être calculées.

2.6.2 Application des métriques

2.6.2.1 Surface brute de végétation

L'analyse seule des trouées ne permet pas d'apprécier entièrement les variations de végétation entre les deux années. Dans un premier temps, une étude brute des surfaces de végétation se doit d'être faite de façon à définir le contexte de la station. Les surfaces de végétation pour chaque strate offrent une première idée des tendances sur le site. La méthode se base sur le nombre de pixel de chaque strate, un pixel est égal à 4 mètres carré. L'outil « rapport sur les valeurs uniques de la couches raster » de Qgis permet de lire le nombre de pixel de chaque raster. Les surfaces de végétation peuvent ensuite être analysées par localisation.

2.6.2.2 Nombre de trouées

Etant donné que chaque trouée détient une « id » unique, le nombre de polygone est directement renseigné dans le fichier « dbf » de la couche. Le nombre de trouée est donc une métrique simple à récupérer qui ne nécessite pas de méthode particulière. De la même manière, le nombre de trouée peut être étudié par emplacement avec l'outil de sélection par localisation sur Qgis.

2.6.2.3 Surface des trouées

Sans la métrique de surface, le nombre de trous ne traduit pas forcément une augmentation ou une diminution de la strate arborée. De façon à mettre en lien ces deux métriques, un champ « surface » dans la table d'attribut permet de calculer l'aire de chaque trouée pour les deux années.

À l'aide de cette métrique, des tests statistiques peuvent être également menés afin d'étudier s'il existe des différences significatives entre les deux jeux de données. L'arbre décisionnel des causes (cf. annexe 3) informe sur le choix du test statistique appropriée pour comparer quantitativement les deux jeux de données en fonction des paramètres. L'objectif recherché ici vise à comparer deux échantillons définis comme indépendants avec des effectifs pour chacun supérieurs à 30 individus. Les données sont considérées comme indépendantes les unes des autres car elles sont séparées par un espace de temps conséquent, plus d'une dizaine d'années. Selon ce postulat, deux tests sont adaptés pour la comparaison, le test de « Student » et le test de « Mann & Whitney ». Dans le cas où les échantillons suivent une distribution normale, le test de « Student » est applicable. Sinon, dans le cas contraire, il faut opter pour le test de « Mann & Withney ». Le teste de « Shapiro-Wilk » sur le logiciel R permet de vérifier la distribution des valeurs. Les autres tests statistiques sont lancés sur XLSTAT.

2.6.2.4 Occupation des trouées

Afin de caractériser l'état des trouées, une autre information est requise : l'occupation du sol aux endroits de celles-ci. L'évolution de la formation ou fermeture des trouées peut aussi être suivie grâce au type d'occupation du sol qui se situe à la place d'une trouée de végétation arborée. Si un terrain nu est observé dans la surface d'une trouée, il est alors possible d'imaginer une mortalité récente des arbres et végétaux sur cette surface, par l'effet d'une perturbation par exemple. Cependant, si un terrain constitué de végétation arbustive se situe dans la surface de la trouée, il est alors supposable que la trouée se « referme », et qu'une végétation arborée y sera retrouvée dans un laps de temps plus ou moins long.

Pour caractériser l'occupation du sol de chaque trouée pour 2003 et 2020, un champ « OccSol » est créé dans les deux couches de trouées. Afin de calculer les valeurs du champ, un codage en langage R sur le logiciel Rstudio est choisi (voir Annexe 8). Le code créé consiste alors en une itération se répétant pour chaque trouée « i » de la couche étudiée : pour chaque polygone « i » de la couche (trouée) une intersection est effectuée avec les couches Raster respectives de végétation arbustive et herbacée afin de déterminer la présence éventuelle de ces strates dans la trouée « i ». Par la suite, un calcul de surface est effectué afin de déterminer l'occupation du sol dominante : strate arbustive, strate herbacée ou terrain nu (étant défini comme l'absence de végétation arborée, arbustive et herbacée), définissant alors la valeur du champ « OccSol » pour la trouée « i ». L'itération est alors effectuée deux fois, une fois pour la couche de trouée de 2003 et une fois pour celle de 2020. Pour mieux comprendre l'attribution des valeurs de ce champ, un schéma récapitulatif de l'itération effectuée est présenté :

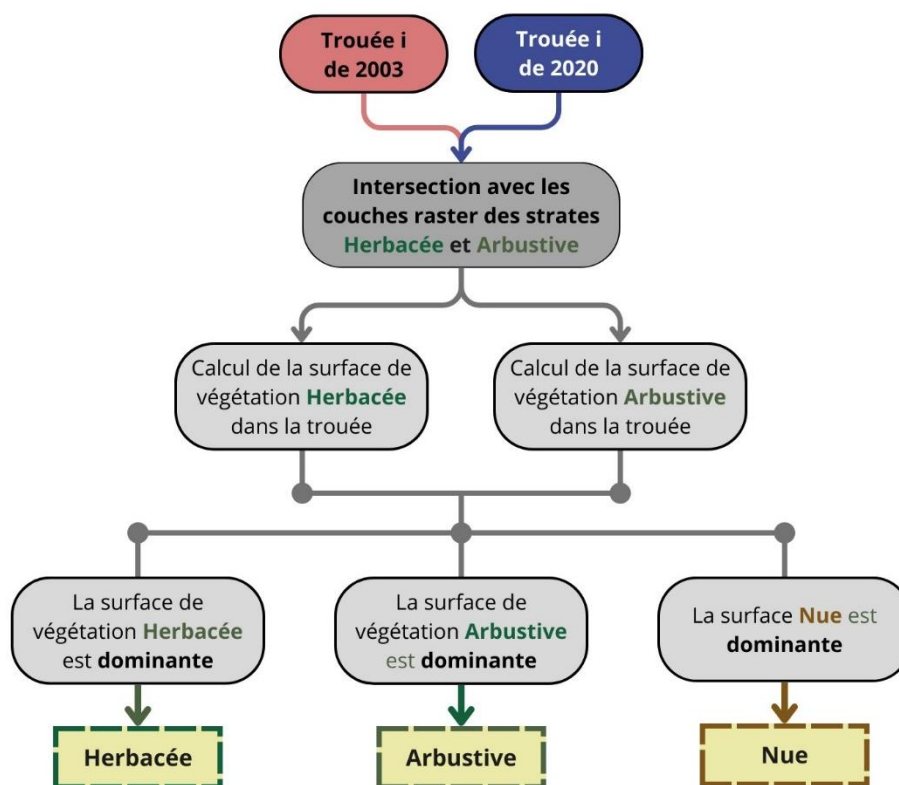


Figure 5: Schéma de l'itération utilisée pour l'attribution des valeurs (en jaune) d'occupation du sol des trouées

Enfin, afin d'analyser les résultats des calculs d'occupation du sol de chaque trouée, une approche graphique de type histogramme est choisi.

2.6.2.5 Evolution des trouées

Les trouées ont chacune leurs propres caractéristiques, qui ont été étudiées grâce aux métriques précédentes. Cependant, ayant à disposition toutes les trouées de 2003 et de 2020 pour une même zone d'étude, une analyse spatiale peut être effectuée sur ces deux jeux de données. En effet, les données concernant les trouées de 2003 peuvent être comparées à celles de 2020 afin d'observer individuellement l'évolution de chaque trouée en l'espace de 17 ans.

Pour suivre ces évolutions, il a été décidé de créer un champ « Etat » pour les deux couches shapefile de trouées. Le but de ce champ sera d'indiquer, pour chaque trouée de l'année 2003, son évolution en observant, à son emplacement, s'il y a présence d'une ou plusieurs trouées en 2020. De la même manière, pour chaque trouée de l'année 2020, il est possible d'attester de la manière dont celle-ci a évolué depuis 2003 en observant les données de 2003 à son emplacement géographique.

Il serait plus précis de procéder au cas-par-cas pour chacune des trouées de 2003 et 2020 concernant l'attribution des valeurs du champ « Etat ». En effet chaque trouée évolue de façon assez indépendante, et de nombreux éléments sont à prendre en compte concernant la nature de son évolution

(position géographique, type d'occupation du sol à proximité, présence d'éléments perturbateurs...). Cependant, au vu du nombre de trouées présentes en 2003 ainsi qu'en 2020, et en prenant en compte le temps imparti pour la réalisation du projet, il a été choisi de ne pas procéder au cas-par-cas. La méthode retenue a été celle du codage d'un script automatique en langage R sur le logiciel Rstudio (voir Annexe 8). Bien que la méthode puisse être moins précise que la procédure au cas-par-cas, elle permet d'avoir une bonne vision de l'évolution des trouées. De plus, en procédant à l'écriture d'un code de manière rigoureuse, la précision des résultats est amplement suffisante. Concernant le code, celui-ci utilise une approche itérative et varie légèrement pour la couche de 2003 et 2020 :

Pour la couche de 2003, un processus est donc répété pour chaque trouée « i » (c'est-à-dire chaque polygone représentant une trouée). Le processus commence par vérifier si une ou plusieurs trouées de la couche de 2020 intersectent avec le polygone de la trouée « i ». En fonction des résultats de cette intersection, plusieurs conditions sont évaluées pour définir la valeur du champ « Etat » de la trouée « i » :

- Si aucune trouée de la couche de 2020 n'intersecte avec la trouée "i", cela indique qu'aucune trouée n'occupe son emplacement en 2020. Dans ce cas, l'état de la trouée est défini comme "Refermée", signifiant qu'elle s'est refermée entre 2003 et 2020.

- Si une seule trouée de la couche de 2020 intersecte avec la trouée "i", il s'agit de la même trouée en 2020. Une comparaison de surface est alors effectuée entre la trouée "i" et celle de 2020. L'état de la trouée "i" est ensuite défini comme "Agrandie" si sa surface est inférieure à celle de la trouée de 2020, "Diminuée" si sa surface est supérieure, et "Stabilité" si les deux surfaces sont équivalentes. Bien que le terme "Déplacée" puisse sembler imprécis, il est retenu avec prudence, étant donné l'absence d'un terme plus approprié.

- Si plus d'une trouée de la couche de 2020 intersecte avec la trouée "i", cela indique une division ou une fermeture partielle de la trouée "i". Dans ce cas, l'état de la trouée "i" est défini comme "Divisée".

En ce qui concerne la couche de trouées de 2020, le processus demeure identique pour chaque trouée de cette année. Toutefois, certaines variations interviennent dans les termes du champ "Etat" :

- Le terme "Refermée" est remplacé par "Nouvelle" pour les trouées de 2020. Ce changement intervient lorsque la trouée "i" de 2020 n'intersecte avec aucune trouée de 2003, indiquant ainsi qu'elle s'est récemment formée et n'existait pas en 2003.

- Le terme "Agrandie" reste inchangé et est attribué lorsque la trouée de 2020 intersecte exactement une trouée de 2003, mais avec une surface supérieure. Cela indique que la trouée a évolué en s'agrandissant entre 2003 et 2020. De manière similaire, le terme "Diminuée" demeure le même, la trouée s'est partiellement refermée, diminuant en taille entre 2003 et 2020. De plus, le terme "Stabilité" conserve son utilisation.

- Le terme "Divisée" est substitué par "Fusionnée". Si plusieurs trouées de 2003 intersectent avec la trouée "i" de 2020, alors cette dernière est considérée comme une fusion de ces trouées. Cela suggère qu'elles se sont agrandies jusqu'à fusionner au fil du temps.

Les termes choisis sont généraux et ne sont pas les plus pertinents individuellement pour chaque trouée. Comme expliqué précédemment, pour obtenir un résultat des plus précis, une procédure au cas-par-cas aurait été plus pertinente. Cependant, après analyse des résultats, il a été attesté que cette méthode permet une analyse très correcte de l'évolution des trouées pour les années 2003 et 2020. Enfin, pour mieux comprendre l'attribution des valeurs du champ « Etat » pour les couches de 2003 et 2020, voici un schéma récapitulatif de l'itération effectuée grâce au code

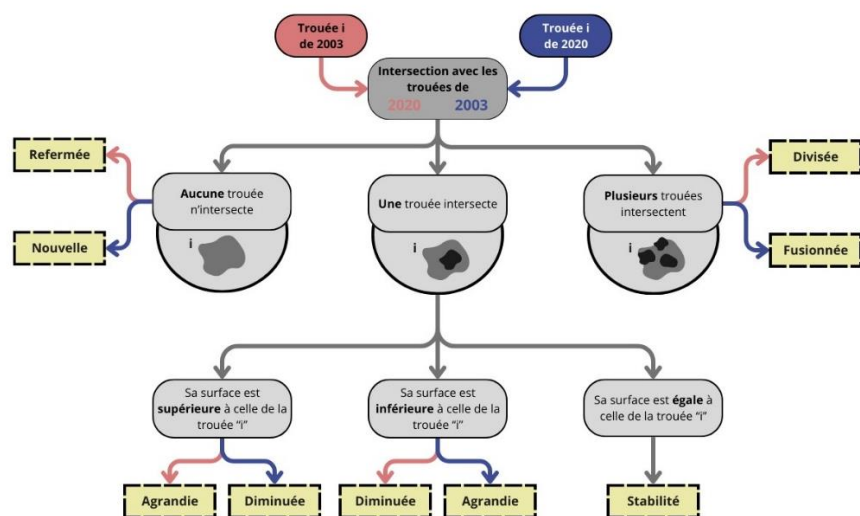


Figure 6: Récapitulatif de l'itération du champ "Etat" des trouées

Enfin, afin de présenter et d'analyser les résultats du champ « Etat » des trouées, deux approches sont choisies : une approche graphique et une approche spatiale. Pour l'approche graphique, un diagramme de type VENN est choisi. L'objectif est de faciliter la comparaison des proportions de trouées pour chaque valeur d'état entre 2003 et 2020, afin de déduire des conclusions sur leur évolution. Ce graphique permettra ainsi

de mettre en évidence les tendances évolutives.

Concernant l'approche spatiale, il s'agira dans un premier temps de représenter spatialement les trouées selon leur valeur d'« Etat », puis de repérer spatialement par des polygones les secteurs ayant une tendance évolutive commune (voir figure 7).

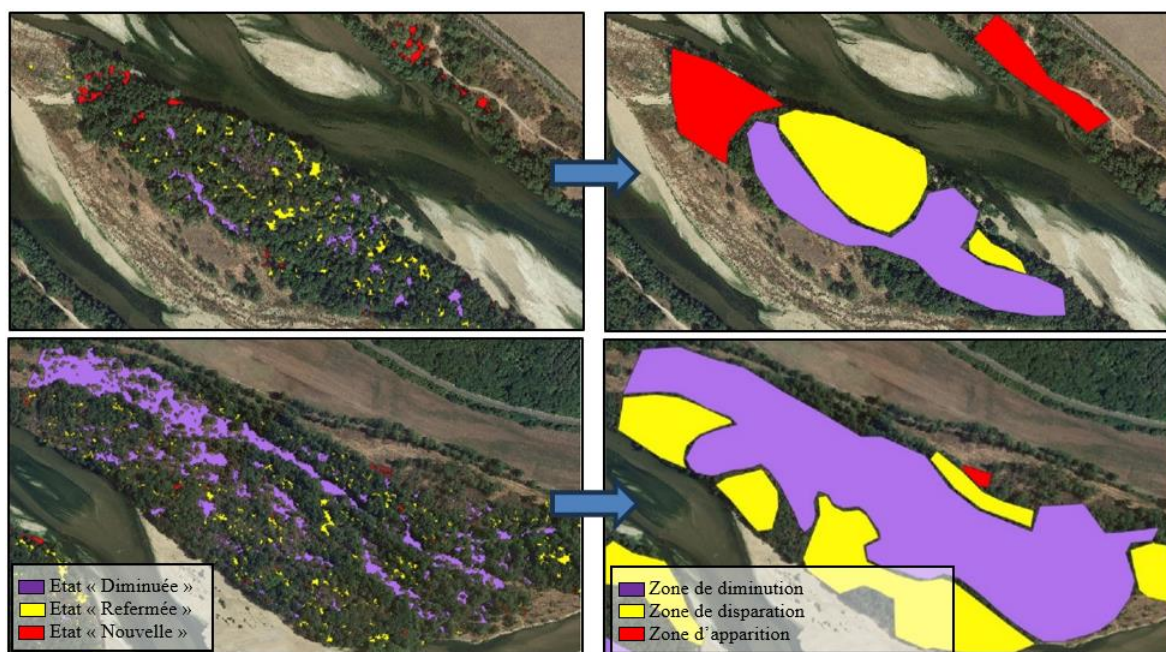


Figure 7 : Processus d'étude spatiale de la valeur "Etat" des trouées

3. Résultats

3.1 Résultat des métriques

3.1.1 Surface brute de végétation

Le tableau ci-dessous renseigne les surfaces de la strate arborée des deux années calculées à partir données LiDAR. Les surfaces sont découpées par localisation.

Tableau 1 : Surface en hectare de la strate arborée pour 2003 et 2020

Temporalité \ Surface (Ha)	Ile	Rive droite	Rive gauche	Total
Strate arborée 2003	6,94	28,39	27,35	62,68
Strate arborée 2020	10,15	42,43	43,70	96,27

Au total la végétation arborée a augmenté d'environ 53 % entre 2003 et 2020. La croissance des communautés de ligneux est la plus marquée sur la rive gauche avec une augmentation d'environ 16 hectares. L'écart n'est pas flagrant entre les deux rives, la même échelle de grandeurs est observée en rive droite avec une augmentation légèrement plus basse, soit 14 hectares. Le développement de la strate ligneuse est moins significatif sur l'île végétalisée avec une expansion de 3 hectares seulement en 17 ans. Cependant, il faut noter que la surface disponible sur ce secteur est relativement plus restreinte.

3.1.2 Nombre de trouées

Contrairement à la surface, le nombre de trouées a diminué entre 2003 et 2020. Plus précisément, le nombre de trouées a diminué d'environ 60 % entre les deux périodes d'acquisition. Le tableau ci-dessous détaille la variation du nombre de trouées après 17 ans.

Tableau 2 : Nombre de trouées de la strate arborée en 2003 et 2020

Temporalité \ Trouées	Ile	Rive droite	Rive gauche	Total
Strate arborée 2003	135	406	337	878
Strate arborée 2020	62	317	169	548

Contrairement à la zone d'étude de la rive droite, le nombre de trouées au sein de l'île végétalisée et la rive gauche a été divisé par deux. Bien que l'augmentation de la végétation sur l'île ne soit que de 3 hectares, il est intéressant de remarquer qu'elle contribue à la fermeture de plus de 50 % des trouées de cette zone. La croissance de strate arborée pourtant importante en rive droite participe seulement à la fermeture de 28 % de trouées. Des questions peuvent être émises concernant la surface des trouées sur ce secteur.

3.1.3 Surface des trouées

Les surface de trouées sont très étendues pour les deux années, s'étalant sur une surface minimale de 12 mètres carré jusqu'à un maximum de 45853 mètres carré. Par conséquent, il a été nécessaire de représenter la distribution à travers une échelle logarithmique pour faciliter la lisibilité du graphique. L'annexe 4 illustre les résultats des surfaces sans passer par une échelle logarithmique.

Etant donné que le seuil surfacique de trouée est de 10 mètres carrés d'après et que chaque pixel correspond à une valeur de 4 mètres carré. Il est logique de constater que les valeurs de surface minimale soit autour 12 mètres carré, étant donné que l'augmentation de l'air augmente par pas de 4 mètres carré équivalent à un pixel. Toutefois, certaines valeurs de surfaces ne sont pas des multiples de 4, ces valeurs proviennent du filtrage opéré dans la partie 2.5.1.

Le box-plot ci-dessous (figure 8) représente la distribution des surfaces pour l'année 2003.

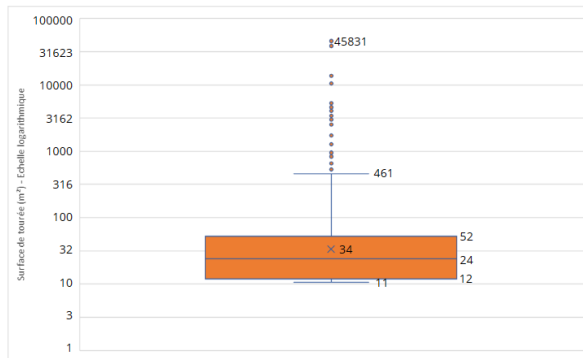


Figure 8 : Distribution des valeurs de surface de trouée en 2003

La médiane sépare les aires des trouées avec pour valeur 24 mètres carré. D'après le troisième quartile, 75% des surfaces de trouées sont comprises entre 11 et 52 mètres carré. La moyenne de la surface des trouées est de 34 mètres carré pour 2003.

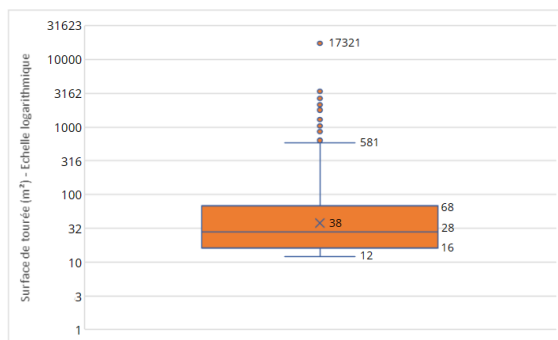


Figure 9 : Distribution des valeurs de surface de trouée en 2020

Pour la distribution de 2020, les surfaces sont généralement supérieures à celles de 2003. En effet, en analysant le premier quartile, la médiane et la moyenne, les valeurs de 2020 sont toutes supérieures de 4 mètres carré. Une augmentation davantage marquée sur le troisième quartile où celui-ci est plus grand de 16 mètres carré. Le maximum du box plot 2020 est inférieur à celui de 2003 mais ne reflète pas le reste de la répartition. Les valeurs de surface sont plus grandes et plus étalées pour l'année 2020, même si le nombre de trouées est inférieur d'après la

partie précédente. Les deux graphiques type bâtons en annexes 6 et 7 permettent d'observer également cet écart de distribution entre les deux périodes.

En calculant la moyenne des surfaces des trouées sur chaque rive en 2003, il est intéressant de constater que la moyenne des surfaces de rive droite (326 Ha) est nettement plus importante que la moyenne des trouées en rive gauche (171 Ha), presque le double.

Afin de comprendre s'il existe une différence significative sur les surfaces entre les deux jeux de données des tests statistiques peuvent être mis en place. Comme expliqué auparavant, le test de « Shapiro-Wilk » doit être réalisé au préalable pour définir le test le plus adapté. Le test analyse la normalité des deux jeux de valeurs et détermine s'ils suivent une distribution normale ou non. Si la valeur p-value calculée est supérieure au seuil alpha alors les données ont bien une distribution normale.

Après avoir lancé le test, la p-value obtenue est inférieure à alpha (0.05). Par conséquent, la distribution n'est pas normale et c'est le test de « Mann et Withney » qui s'avère être le plus approprié pour notre étude.

Pour ces deux jeux de données, l'hypothèse nulle H_0 est posée : la différence de position des échantillons est égale à 0. L'hypothèse H_1 est alors : la différence de position des échantillons est différente de 0. Si la p-value est supérieure au seuil de signification alpha alors H_0 ne peut pas être rejeté, H_0 est donc accepté. D'après XLSTAT (cf. annexe 5), la p-value obtenue est égale à 0,006 et alpha est égale à 0,05. La p-value est donc inférieure à alpha, H_0 est alors rejetée et H_1 accepté. Il existe donc bien une différence significative concernant les surfaces de trouées entre 2003 et 2020. La partie analyse et discussion émettra des hypothèses pouvant être à l'origine de la différence significative entre les deux jeux de données.

3.1.4 Occupation des trouées

Voici ci-dessous les résultats de l'analyse des occupations du sol des trouées de 2003 et 2020. Les valeurs « arbustive » et « herbacée » indiquent que ce sont les strates arbustives ou herbacées respectivement qui constitue majoritairement la trouée. La valeur « Nue » indique qu'une absence de végétation est dominante dans la trouée.

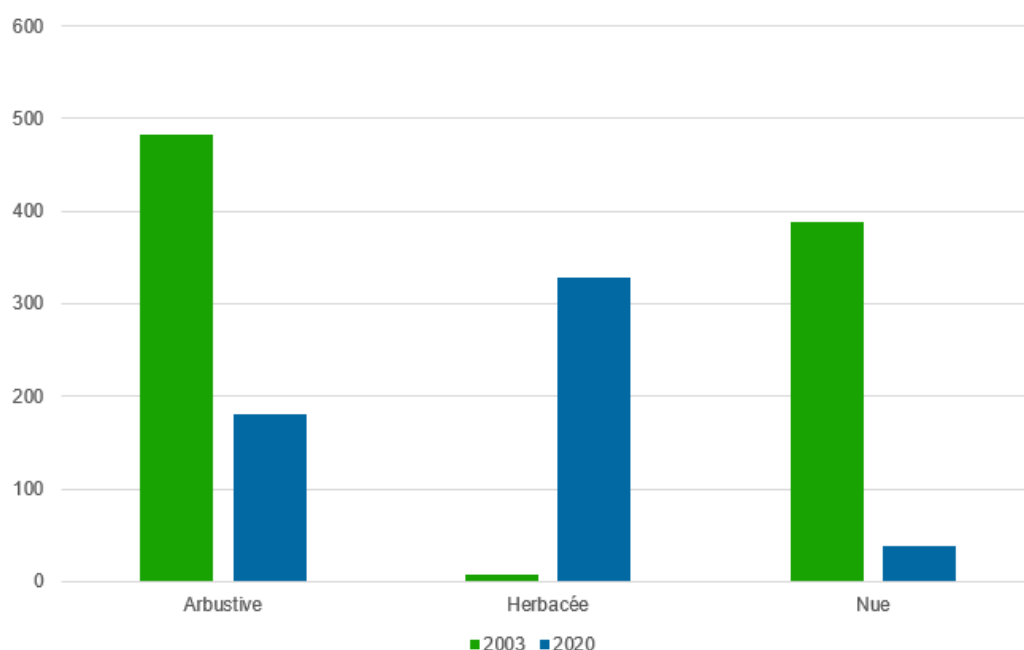


Figure 10: Histogramme des occupations du sol des trouées de 2003 et 2020

3.1.5 Evolution des trouées

Voici ci-dessous les résultats des valeurs du champ « Etat » des trouées de 2003 et 2020 sous forme de diagramme de VENN.

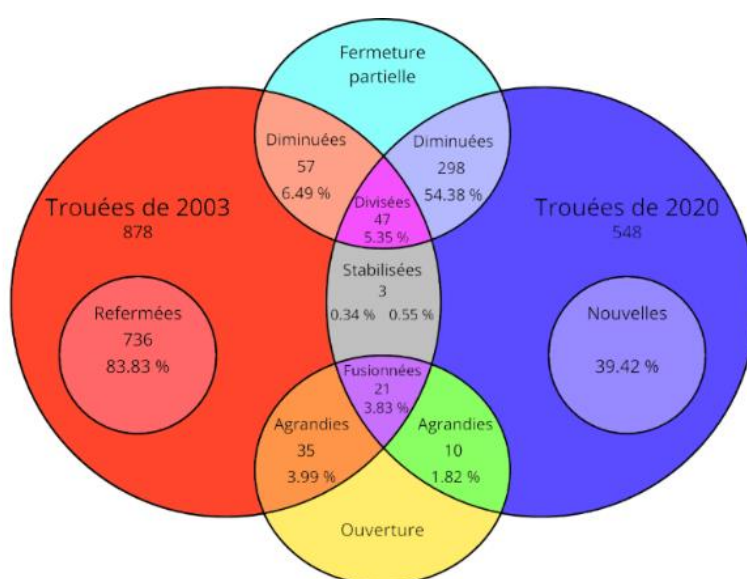


Figure 11: Diagramme de VENN des valeurs d'Etat des trouées de 2003 et 2020

Voici ci-dessous les résultats de l'étude spatiale des trouées de 2003 et 2020 selon la valeur de leur champ « Etat » :

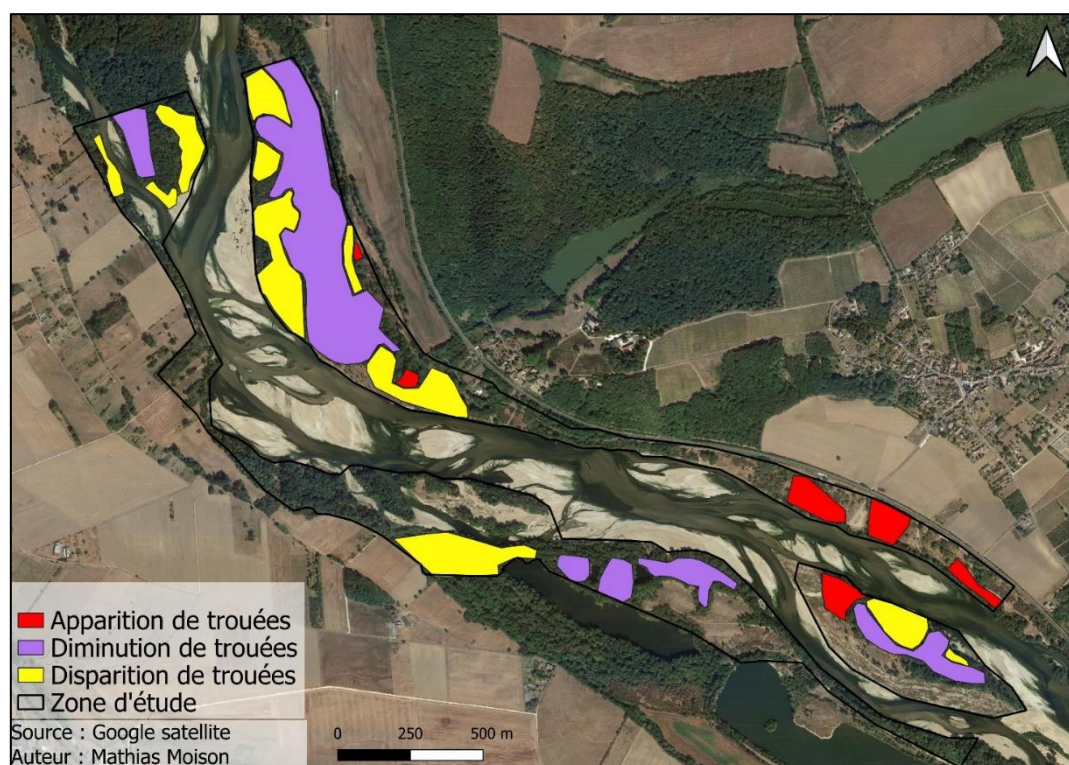


Figure 12 : Zones identifiées par des dynamiques d'évolution marquée de strate arborée entre 2003 et 2020

4 Analyse et discussion

4.1 Analyse quantitative

À partir des différentes métriques quantitatives calculées, deux éléments sont à mettre en évidence. Tout d'abord, l'ensemble des résultats prouvent non pas une perte de la surface arborée mais belle est bien un développement de la végétation ligneuse sur la station. L'augmentation de surface est significative et se manifeste sur deux métriques liées, la surface brute de la végétation arborée et le nombre de trouées. En s'étendant depuis le sol, les ligneux combleront directement des zones de trouées et participent à la fermeture du milieu. Entre 2003 et 2020, l'augmentation de 53 % de la strate arborée contribue à la fermeture de 60 % du nombre de trouées. Cette information permet d'émettre l'hypothèse que les ligneux se développent

préférentiellement au sein de trouées de façon à recoloniser le milieu avant de se propager vers l'extérieur de la forêt alluviale. Cette tendance peut être induite par des barrières physiques comme des routes, des champs cultivés ou le chenal de la Loire tout simplement. Les surfaces déjà enclavées par la végétation sont plus accessibles et ainsi plus facilement colonisables par les arbres comparés aux zones en dehors du peuplement arboré.

Deuxièmement, les résultats démontrent que la localisation des trouées joue un rôle sur les dynamiques de fermeture. En effet, en s'intéressant au découpage du nombre de trouées par secteur (cf. tableau 2), il est facile de constater un écart conséquent entre le nombre de trouées de la rive droite et de la rive gauche. En 2020, 317 trouées sont toujours identifiées en rive droite, ce qui équivaut à une diminution de 28 % des effectifs par rapport à 2003. Quant à la rive gauche, le pourcentage de fermeture est beaucoup plus important et correspond

presque au double de la rive droite. En l'espace de 17 ans, seulement 89 trouées ont disparu de la canopée arborée en rive droite tandis que 168 se sont refermées en rive gauche. Pour comprendre les causes de cette évolution, il faut mettre en lien le nombre de trouées avec la surface des trouées.

En analysant spatialement les métriques de surface, une nette différence est constatée entre la moyenne des surfaces de trouées de la rive droite et la rive gauche. Les tailles de trouées en 2003 sur la rive droite sont presque deux fois plus importantes que celle en rive gauche. Ce facteur peut expliquer pourquoi davantage de trouées se sont refermées en rive gauche plutôt qu'en rive droite en 2020. De ce fait, les trouées de plus petites tailles en rive gauche se referment plus rapidement que celles en rive droite qui nécessitent davantage de temps pour se combler entièrement. Les variations de la taille de trouées peuvent traduire des contextes d'occupation différents du sol avec des pressions différentes par le passé.

Concernant les tests statistiques, le test de « Mann et Whitney » a permis de mettre en évidence la présence d'une différence significative entre les deux échantillons. Un ou des facteurs externes viennent donc modifier significativement les deux jeux de données. Cette variation de distribution de surface est également visible sur les box plots (cf. figure 8 et 9). Les quartiles permettent de visualiser les différences de surface entre 2003 et 2020, les petites trouées ont tendance à se refermer au cours du temps, laissant place à des trouées de plus grande taille seulement. Cette disparité confirme également la présence d'un facteur qui vient favoriser la densification de la strate arborée dans la plaine alluviale. D'après la carte de végétation de la DREAL de 2015 (cf. annexe 1), des secteurs de la plaine sont en cours de colonisation par de nouvelles communautés de ligneux. Cette indication est en cohérence avec nos résultats puisqu'elle indique une nouvelle fois que le milieu est propice aux développements de la

végétation. Dans la partie « réponses aux hypothèses », il s'agira d'essayer de définir le facteur responsable de la diminution du nombre de trouées.

4.2 Analyse qualitative des évolutions des trouées

Analyser les dynamiques d'évolution des trouées est un objectif clé du projet. Grâce aux acquisitions LiDAR multi-temporelles, cette analyse est possible entre les deux années (**Dalagnol et al., 2019**), et est expliquée dans cette partie du projet.

4.2.1 Analyse des résultats de la métrique d'occupation du sol

Une première approche de l'analyse des résultats concernant l'évolution des trouées de végétation est une analyse qualitative des résultats des différents graphiques obtenus. Tout d'abord concernant la métrique d'occupation du sol des trouées : en 2003, environ 60% des trouées étaient principalement composées d'arbustes, tandis qu'environ 40% étaient majoritairement constituées d'un sol sans végétation. Seulement 1 à 2% des trouées étaient principalement formées par une strate herbacée. L'interprétation de ces données est complexe. D'une part, les trouées composées d'arbustes suggèrent une certaine fermeture en cours de celles-ci, indiquant une certaine tendance de fermeture des trouées de végétation : les arbustes croissants combleraient progressivement ces trous de la strate arborée. De manière générale, les processus de rétablissement post-perturbation des forêts sont décrites en six étapes par **Duke (2001)** : (1) forêt mature fermée, (2) initiation de trouées, (3) ouverture de trouées, (4) recrutement de trouées, (5) comblement des trouées et (6) fermeture de la trouée. L'observation retenue indique donc un processus de recrutement en cours des trouées (processus numéro 4 selon **Duke**) signifiant leur fermeture prochaine. Il est ainsi suggéré

que ces trouées ne se sont pas récemment formées, et leur ancienneté a favorisé l'émergence d'une nouvelle végétation destinée à combler ces espaces. La régénération des trouées ainsi que leur fermeture est un phénomène important dans la dynamique des forêts : on parle de « régénération réussie » (**Hartshorn, 1978**).

D'un autre côté, les trouées étant majoritairement composées d'un sol nu suggèrent une mortalité totale de la végétation à ces endroits, potentiellement expliquée par des perturbations récentes. Dans ces cas, la végétation n'aurait pas encore eu le temps de repousser, une autre explication serait que ces zones pourraient être inhospitalières dû à des perturbations/facteur locaux. Cependant, l'absence presque totale de trouées composées d'herbes est suspecte. Cette incohérence peut être expliquée par la qualité des données de 2003. Le LiDAR utilisé pour acquérir ces données n'étant pas très performant, il est possible que la végétation herbacée n'ait pas été entièrement détectée, et ainsi de nombreuses trouées répertoriées comme "nues" pourraient en réalité être constituées d'herbacées non détectées par le LiDAR de 2003. Cette observation est confirmée en analysant les données de 2020, qui présentent, à l'inverse, un grand nombre de trouées constituées d'herbacées et très peu constituées de sol nu, renforçant la cohérence de cette constatation étant donné que la qualité du LiDAR pour les données de 2020 est bien supérieure.

En analysant les données de 2020, on regarde des tendances d'occupation du sol des trouées différentes. En effet, beaucoup moins de trouées sont majoritairement constituées d'arbustes, et la grande majorité des trouées sont constituées d'herbes. Cette observation suggère que la plupart des trouées ne soient pas, ou très peu, en processus de fermeture contrairement à 2003 : celles-ci ne présentent pas de végétation arbustive qui pourrait combler la

trouée dans un laps de temps assez court. Il se pourrait ainsi que la tendance de fermeture des trouées observée en 2003 ne soit plus d'actualité en 2020, ou en tout cas à une échelle moindre : la plupart des trouées observées en 2020 ne seront pas comblées avant un certain temps.

Plusieurs explications sont envisageables : des facteurs entravent le développement de la strate arbustive nécessaire à la régénération des trouées, ou bien, selon le modèle d'étapes de **Duke (2001)**, ces trouées semblent se situer au même stade de rétablissement post-perturbation, précédant le recrutement des trouées. Il est possible qu'elles aient été générées simultanément, expliquant ainsi leur état de régénération similaire et leur rétablissement suivant une cadence commune conformément aux étapes définies par **Duke**.

4.2.2 Analyse des résultats de la métrique d'Etat des trouées

Ces constats peuvent être poursuivis en analysant les résultats de la métrique « Etat » des trouées. Tout d'abord, concernant la tendance de fermeture des trouées observée en 2003 : le diagramme de Venn révèle d'abord qu'une proportion significative (83.83%) des trouées identifiées en 2003 se sont refermées entre cette année et 2020. De plus, parmi les 16.16% restants, 11.84% correspondent à des trouées partiellement refermées, comprenant 6.49% de trouées ayant "diminué" et 5.35% s'étant "divisées" (c'est-à-dire qu'une végétation arborée a partiellement recolonisé la trouée, transformant la trouée originelle en diverses trouées de plus petite taille). Enfin, seules 3.99% des trouées de 2003 se sont ouvertes davantage (valeur "aggrandies") en 2020. Ces données appuient ainsi une tendance générale à la fermeture des trouées plutôt qu'à leur ouverture : les trouées existant en 2003 ont tendance à se refermer (entièrement ou partiellement).

Cette observation suggère que la majorité des trouées de 2003 résultent de perturbations locales n'étant plus d'actualité, ayant entraîné une mortalité de la végétation arborée, conduisant à la formation de trouées qui se sont progressivement refermées au fil du temps. En effet, si ces trouées continuaient de s'ouvrir, ou ne se refermaient simplement pas, cela aurait signifié que la perturbation ayant entraîné la mortalité de la végétation était toujours d'actualité, ou qu'un facteur local aurait rendu le sol des trouées non propice au développement d'une végétation arborée. Cette tendance de fermeture est donc plutôt logique. A partir de l'instant où un terrain est propice au développement d'une végétation arborée, celle-ci va s'y développer de manière plus ou moins rapide. La fermeture progressive des trouées est alors le processus normal, attendu, à l'égard de celles-ci.

Cependant, cette observation peut aussi être expliquée par un autre facteur : la précision limitée des données LiDAR de 2003 pourrait être un facteur influençant. En effet, de nombreuses trouées détectées en 2003 pourraient en réalité être des erreurs d'acquisition, résultant d'un manque de précision et d'une résolution insuffisante du LiDAR de l'époque. Malgré les tentatives d'amélioration de la précision des données, telles que le calcul de la résolution des rasters à partir des données de 2003, il est plausible que de nombreuses trouées détectées à cette époque soient en réalité des erreurs d'acquisition, expliquant ainsi le grand nombre de trouées s'étant entièrement refermées entre 2003 et 2020. Cette possibilité est illustrée sur la figure 13, où l'on observe une superposition de trouées détectées en 2003 avec une ortho-photo de la même année. Bien que l'identification des trouées ne soit pas toujours évidente sur photographies, en particulier lorsque les occupations du sol des trouées contiennent de la végétation arbustive ou herbacée, il est tout de même notable que peu de trouées détectées sont actuellement visibles,

entraînant une suspicion concernant leur actuelle présence.

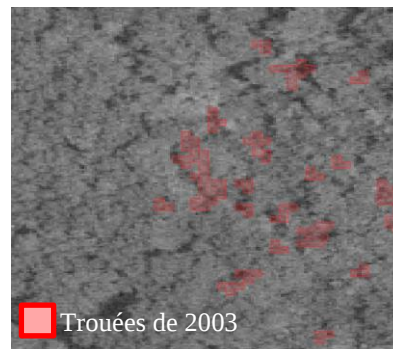


Figure 13: Exemple de trouées de 2003 non visibles sur une ortho-photo de la même année

Cependant, il est évident que ce facteur lié à l'outil LiDAR n'aient qu'une certaine influence sur les résultats observés, notamment sur le nombre de trouées « refermées » entre 2003 et 2020 comme expliqué ci-dessus. Cette influence est moindre au regard des résultats et ne remet pas en cause les tendances d'évolution des trouées observées pour la métrique « Etat », qui sont en accord avec les tendances observées pour la métrique d'occupation du sol.

Du point de vue de l'année 2020, 54,38% des trouées se sont partiellement refermées par rapport à 2003. Cette observation met en évidence et valide une nouvelle fois la tendance de fermeture des trouées de végétation arborée en 2003.

D'un autre côté, on remarque que 39,42% des trouées de 2020 sont récentes et n'étaient pas présentes en 2003 (valeurs d'état « nouvelles »), mais également que 3,83% des trouées présentes en 2003 se sont davantage ouvertes, jusqu'à « fusionner » (ce terme sera analysé plus bas), tandis que 1,83% des trouées de 2020 sont considérées comme « agrandies » par rapport à 2003. Cette constatation met en évidence qu'au-delà de la tendance de fermeture observée, il persiste une certaine dynamique de mortalité au sein de la végétation arborée. Cela se traduit par l'apparition de nouvelles trouées,

ainsi que l'élargissement de certaines trouées initialement repérées en 2003. Cette autre tendance peut être également reliée aux résultats analysés plus haut, de la métrique d'occupation du sol. En effet, le constat pour 2020 qui y a été établi semble se confirmer ici : la tendance de fermeture des trouées de 2003 semble s'affaïsser en 2020. Les trouées présentes cette année ne semblent pas être en grande partie en cours de fermeture (d'après les résultats de l'analyse de la métrique d'occupation du sol plus haut). De plus on observe ici une certaine tendance d'ouverture de la végétation arborée, avec l'apparition de nombreuses nouvelles trouées et l'agrandissement de certaines trouées déjà présentes en 2003.

Il est toutefois important de traiter avec prudence les valeurs de la métrique « Etat ». Certains termes choisis pour pointer des phénomènes d'évolutions peuvent être difficile à prouver. L'estimation de la fusion (valeur « fusionnée ») de certaines trouées par exemple, est compliquée. La « fusion » des trouées, peut par exemple être expliqué avec le phénomène de contagion des trouées, notamment mis en avant par **Janser & Meer (2008)** et notamment étudié par **Hunter et al (2015)**. Ce phénomène induit l'augmentation du risque de perturbation autour d'un trou existant. L'étude de ce phénomène est encore récente et a été peu approfondie, mais elle pourrait par exemple expliquer les phénomènes de « fusion » observés.

Cependant, d'autres explications peuvent biaiser les résultats. Par exemple, il est envisageable que des trouées théoriquement "fusionnées" ne le soient pas réellement, et qu'une ou plusieurs autres trouées se soient ouvertes pour « relier » les trouées originales. Il en va de même pour les valeurs ambiguës telles que les trouées « divisées » : il est difficile d'attester qu'une trouée de grande surface en 2003 résultant en plusieurs trouées de plus petites surfaces en 2020 soient le fruit d'une fermeture partielle de celle-ci jusqu'à division. Il n'est pas

impossible, par exemple, que la trouée originelle se soient entièrement refermée, et que ce soient d'autres perturbations locales qui ont entraîné l'apparition de trouées différentes à l'endroit de celle qui est supposée « divisée ».

Également, il est à rappeler que les deux ensembles de données sont séparés par une période de 17 ans. La comparaison des trouées des deux années repose sur une approche spatiale (voir description de l'itération utilisée, *figure 6*), suggérant que si une trouée de 2003 se situait au même endroit, partiellement ou en totalité, qu'une trouée de 2020, alors les deux étaient reliées, ou dans certains cas, il s'agissait de la même trouée ayant évolué. Cependant, entre 2003 et 2020, il est plausible que la trouée initiale se soit refermée, laissant place à une autre ouverture. En effet, il est estimé qu'entre le moment de la perturbation engendrant une trouée, et le début de la phase de fermeture de celle-ci, 10ans s'écoulent en moyenne (**Duke, 2001**). La difficulté de déterminer ces évolutions constitue l'une des limites du projet. Une approche au cas par cas ou des données temporelles plus rapprochées auraient été nécessaires pour plus de précision.

Dans un certain aparté, une question peut se poser, celle-ci est de se demander pourquoi seulement 6.49% de trouées sont notées « diminuées » en 2003, contre 54,38% en 2020. En effet, il s'agit de la même signification : ces deux valeurs désignent des trouées de 2003 s'étant partiellement refermées (ayant « diminuées » en 2020, les valeurs pour les deux années devraient ainsi être assez proches, voir égales. Cette différence significative provient de la manière donc les valeurs d'état ont été attribuées. La valeur « diminuée » indique, pour une trouée d'une année (2003 ou 2020), qu'à l'endroit de la trouée, sur l'autre année, une trouée plus petite (pour 2003) / plus grande (pour 2020) est présente. Or, le grand nombre de trouées « diminuées » en 2020

s'explique par le fait que plusieurs trouées de très grande surface de 2003 se sont partiellement refermées et ont été « divisées ». Chaque trouée résultante de cette fermeture partielle (ou « division ») est donc marquée « diminuée » puisqu'elle se situe à l'emplacement de la trouée de grande surface de 2003. Le nombre de trouées de grande surface en 2003 s'étant partiellement refermée n'est pas très grand (il concerne 5.35% des trouées de 2003) mais leur grande surface impacte fortement les résultats et explique le très grand nombre de trouées « diminuées » en 2020

En conclusion, bien que les valeurs d'état ne soient pas d'une précision absolue, elles permettent néanmoins de dégager des tendances relatives aux trouées. On observe alors une tendance de fermeture des trouées de végétation arborée en 2020, en observant notamment de nombreuses trouées s'étant fermées en 2020, ou étant en cours de fermeture en 2003. Cette tendance semble ralentir en 2020, et une tendance d'ouverture de végétation semble persister, bien que faible. L'observation la plus intéressante évoquée en 2020 est le fait que contrairement à 2003, la plupart des trouées de 2020 ne semblent pas être en cours de fermeture, supposant un « ralentissement » des dynamiques de fermeture de la végétation arborée. Pour mieux analyser ces tendances observées sur les deux années, une analyse spatiale, présentée ci-dessous, a permis de remettre dans un contexte spatial les dynamiques d'évolution des trouées de végétation.

4.3 Analyse spatiale des dynamiques d'évolution

En effet, les dynamiques de végétation, notamment les vitesses de régénération des forêts, sont influencées par de nombreux paramètres. Ceux-ci concernent par exemple le type de perturbation ayant causé leur apparition, mais également l'environnement de la zone

de la trouée (**Oliver et Larson, 1996**). Une analyse spatiale est donc plus que pertinente afin de comprendre et situer spatialement les tendances d'évolution observées. Cette partie consistera à examiner quatre principaux secteurs identifiés comme des zones à dynamiques particulières. À travers ces analyses, l'objectif sera de déterminer les facteurs d'évolution et l'influence de l'environnement sur ces secteurs.



Figure 14 : Secteur 1 - rive droite

Le premier secteur s'intéresse aux zones à tendances d'apparition de trouées. Trois polygones rouges sont concentrés sur la rive droite à l'est de la station. Ce linéaire restreint est le seul secteur où des zones de formation de trouées sont significativement observées. Des pressions s'exercent donc sur ce lieu. Cependant, après avoir analysé des ortho photos, il semblerait que des activités humaines perturbent cet endroit. En effet, au cours du temps, plusieurs chemins de plus en plus larges viennent s'implanter et empiètent sur la végétation de la plaine alluviale. Ces activités limitent la légitimité de ce secteur pour répondre à notre question scientifique puisqu'il est influencé par des facteurs non naturelles et externes à la plaine alluviale. Le choix est donc fait de mettre de côté cette zone pour ne pas biaiser les interprétations.



Figure 15 : Secteur 2 - rive droite

Sur la même rive, à l'ouest de la station, une grande zone à tendance de diminution de trouée est observée. L'air en violet sur cette zone est bordé par plusieurs polygones jaune côté rive. L'ensemble de ce secteur constitue une zone d'expansion de la strate arborée. Des pressions s'emblent avoir disparues sur ce secteur ce qui expliquerait le développement de la strate arborée. En effet, d'après les ortho photos sur *géoportail*, un chenal multiple de la Loire traversé anciennement le milieu de ce secteur (cf. figure 16). Avec le temps, le bras emprunté par le passé s'est comblé puis refermé, à tel point que les flux d'eau ne passent plus via cet accès en 2020 (cf. figure 17).



Figure 16 : Ortho photos établissent la présence d'un chenal multiple, photo droite été 1949, photo gauche hiver 1957 (source : *géoportail*)



Figure 17 : Ortho photos justifiant la fermeture du chenal multiple, photo droite hivers 2020, photo gauche été 2023 (source : *géoportail*)

Ce phénomène entraîne la colonisation du milieu par la végétation, ce qui contribuerait en partie à la diminution du nombre de trouées en 2020. De plus, ce secteur en rive droite, pourrait expliquer l'origine de la taille plus importante des trouées du côté de cette berge. Etant donnée que la végétation arborée dans le chenal était absente par le passés, les tailles des trouées sont par conséquent plus grandes à cet endroit. Les trouées sont donc en cours de fermeture dans l'ancien bras et demandent un temps plus long pour se refermer. Tandis que

sur l'ancienne île végétalisée avant séparée par l'ancien bras, la végétation arborée était déjà bien implantée depuis 2003. Au cours de ces dix-sept ans, les trouées ont fini par complètement se refermer sur ce secteur comme l'illustre les polygones jaune.

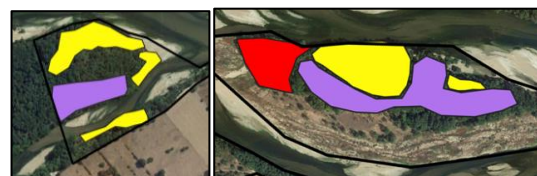


Figure 18 : Secteur 3 - les îles végétalisées

Pour les secteurs des îles végétalisées qui sont localisé de part et d'autre de la station, les tendances sont également favorables à la fermeture des trouées. Pourtant, dans ces zones, il n'existe pas d'anciens chenaux multiples pouvant expliquer ces dynamiques. D'autres facteurs interviennent donc dans cette évolution. Parmi les facteurs possibles, la diminution de la fréquence des phénomènes de crue exceptionnelle pourrait constituer une hypothèse pour une future étude. Cette hypothèse prendrait forme à partir de la constatation de la densification des strates arborées sur les îles végétalisées de la Loire. Dans les conditions où les épisodes de crues sont moins intenses et moins fréquent, les espèces ligneuses sont moins souvent submergées et confrontées aux forces du courant diminuant les pourcentages de mortalité chez les individus. De cette façon, les perturbations abiotiques sont limitées facilitant ainsi la colonisation du milieu par les arbres.

Ne disposant pas de l'ensemble de ces informations, la courbe de tendance des débits instantané maximal mensuel (QIXM) à proximité de la station peut éventuellement être analyser dans un premier temps. Le graphique ci-dessous récupéré sur *hydroportail* représente les données d'une station d'enregistrement localisée à Saint-Satur, à trois kilomètres en aval de la station de Bois Gibault.

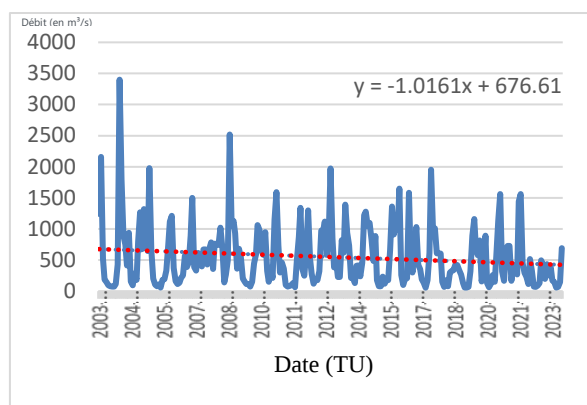


Figure 19 : Débit instantané maximal mensuel - La Loire à Saint-Satur – 2003 à 2023 (source : Hydroportail)

Il serait extrêmement précoce de faire une corrélation directe entre la diminution moyenne des débits maximal mensuel et la fermeture des trouées sur les îles végétalisées de la station d'étude. Néanmoins, cette corrélation pourrait faire l'objet d'une future question scientifique pour comprendre l'impact de l'hydrologie dans les dynamiques d'évolution de la strate arborée sur les îles végétalisées de la Loire.



Figure 20 : Secteur 4 - proximité dans anciennes gravières

Enfin, pour le dernier secteur identifié, localisé autour des anciennes carrières d'extraction, la tendance est encore une fois à la diminution de la surface des trouées. Sur la carte deux couleurs sont observées, des polygones violets et un jaune signifiant globalement que cette zone est en cours de recolonisation. En effet, ce secteur fut impacté par des travaux menés par le passé comme le montre l'ortho photo ci-dessous de 1990.



Figure 21 : Extraction de granulats dans le lit majeur de la station en 1990 (source : géoportail)

Les travaux ont conduit à la déforestation et à la fragmentation de la forêt alluviale initialement présente sur ce secteur. Les données de 2020 permettent de constater que dans cette zone, la strate arborée alluviale est en train de se réappropriier le milieu et la végétation se rescindent au fur et à mesure du temps. Une importante partie de ce secteur est déjà recoloniser par les communautés de ligneux.

4.4 Réponses aux hypothèses

Au cours de notre analyse, il a été démontré que les dynamiques d'évolution entre 2003 et 2020 sont contraires à notre hypothèse initiale. Cette étude permet de rejeter l'hypothèse H1 statuant une augmentation du nombre de trouées entre 2003 et 2020. Le nombre de trouées n'a pas augmenté sur la station de Bois Gibault, à l'inverse il a significativement diminué. Le test de « Mann et Withney » traduit une distribution de la métrique surface significativement différente qui a tenté d'être corrélée avec différents facteurs. Le phénomène d'incision sur la Loire est l'une des causalités majeures de cette étude responsable de la diminution de la ligne d'eau et de la fermeture de certain bras comme le montre l'état du bras aujourd'hui refermé dans le secteur deux. L'établissement d'un lien direct entre le réchauffement climatique et les dynamiques de végétation est plus complexe, toutefois, il nécessite de s'y intéresser.

4.5 Critiques et points d'amélioration

Certaines critiques peuvent être effectuées quant aux méthodes employées pour le projet, et des points d'amélioration peuvent être proposés. Tout d'abord, certaines problématiques sont apparues lors de la phase du filtrage des trouées de 2003 et 2020. En effet, les forêts alluviales de la station d'étude choisie, proche de Bois Gibault, sont très limitées dans leur surface : de nombreuses activités et aménagements anthropiques bordent ces forêts, ou sont situées au sein de celles-ci (chemins, routes, bâtiments, parcelles agricoles...). Ainsi les perturbations exercées par l'Homme compliquent le filtrage et l'identification des trouées. A plusieurs reprises, la question suivante s'est posée : « s'agit-il réellement d'une mortalité arborée apparue par une perturbation locale, ou au contraire, est-ce l'activité humaine directe qui en est la cause (abattage, création de chemins...) ? »

Néanmoins, pour ces zones incertaines, aucune tendance d'évolution n'a pu être clairement diagnostiquée en raison de l'hétérogénéité prononcée de l'état des trouées dans ces secteurs. Idéalement, plusieurs études comparatives auraient été nécessaires, mais des contraintes de temps ont limité cette possibilité.

Un autre point d'amélioration à souligner concerne l'étape d'étude d'évolution des trouées de végétation, notamment par étude spatiale entre 2003 et 2020 (itérations donnant les valeurs d'état et d'occupation du sol des trouées, voir *Figures 5 et 6*). En effet lors de l'attribution des valeurs de ces champs, l'approche choisie est celle de la comparaison spatiale entre plusieurs entités : entre les trouées de 2003 et 2020 pour les valeurs du champ « état », et entre les trouées et les strates herbacée et arbustive pour les valeurs du champ « Occupation du sol ». Notamment, cette approche par comparaison utilise des méthodes d'intersection pour identifier les entités étant situées au même emplacement

géographique (voir partie 2.6.2.3 et 2.6.2.4). Cependant, ces intersections utilisent des couches au format raster, constituées de grilles de pixels, pour identifier les entités de trouées ou de strates. Le problème suivant est alors à souligner : lors des rastérisations des différentes couches, ces « grilles » ne sont pas parfaitement alignées entre elles, résultant en des pixels ne se superposant pas exactement. De ce fait, certains pixels des entités analysées ont été détectés comme s'intersectant, mais cette intersection était en réalité le résultat du décalage des grilles de raster (voir *figure 21*).

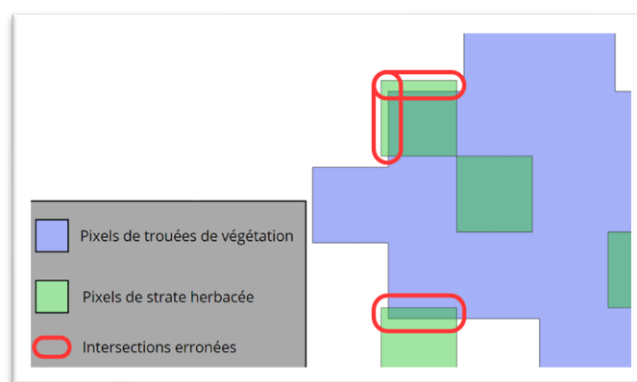


Figure 22: Exemple d'erreur d'intersection entre plusieurs entités raster

Pour limiter ce problème, une amélioration du code sur Rstudio pourrait être d'implémenter un seuil de surface d'intersection, de manière à ne considérer une intersection entre deux pixels à la condition que la surface d'intersection des deux pixels d'entités dépasse ce seuil. De cette manière, les métriques d'état et d'occupation du sol ne seraient pas biaisés par ce problème.

Il est aussi important de noter que l'étude s'est concentrée sur l'étude qualitative et quantitative des trouées de végétation afin d'identifier les dynamiques d'évolution. Ces dernières offrent une approche pertinente pour caractériser les tendances évolutives des forêts. Toutefois, il est crucial de revenir à la définition des trouées en tant que trous dans la canopée provoqués par une ou plusieurs perturbations (**Whitmore, 1989 ; Muscolo**

et al., 2014 ; Marra et al., 2018). Pour une compréhension plus approfondie des dynamiques de végétation, il serait nécessaire d'explorer les origines spécifiques des trouées observées, permettant ainsi d'identifier et comprendre les tendances émergentes. Cependant, cette tâche est complexe, nécessitant des données plus précises qui sont difficiles à obtenir à grande échelle et difficiles à justifier. De nombreux facteurs, tels que le réchauffement climatique (Rifai et al., 2016), l'incision de la Loire (Scott et al., 2000), ainsi que des perturbations locales, biotiques ou abiotiques (Hefley, 1937 ; Esquivel-Muelbert et al., 2020), entrent en jeu. Ce projet vise à mettre en évidence et comprendre les dynamiques évolutives des forêts, mais il ne prétend pas les expliquer intégralement.

De manière plus générale, l'analyse des trouées est pertinente pour évaluer et les phénomènes de mortalité des arbres, mais elle ne permet pas une compréhension exhaustive ceux-ci. En effet, il existe des cas où la mortalité d'un arbre survient sans nécessairement créer de trouée (par exemple, lorsque les troncs ne tombent pas). Dans une analyse comme celle de ce projet, la mortalité des arbres ligneux peut donc être sous-estimée (Espirito-Santo et al., 2013 ; Dalagnol et al., 2021). Les décès détectés se limitent alors au cassage ou au déracinement des arbres, représentant en réalité seulement 50% de la mortalité forestière totale (Chao et al., 2009 ; De Toledo et al., 2012 ; Esquivel-Muelbert et al., 2020). Pour remédier à ces lacunes, il est envisageable de combiner l'utilisation du LiDAR avec d'autres outils, comme des photographies aériennes hyperspectrales, afin d'améliorer l'extraction des caractéristiques des trouées (Zhang, 2008).

5 Conclusion

En conclusion, l'étude quantitative a permis dans un premier temps de constater un nombre de trouées à la baisse entre 2003 et 2020. Les trouées en 2020 sont moins fréquentes, néanmoins, pour celles toujours présentes, leurs superficies sont de plus grandes tailles. La tendance globale demeure malgré tout une tendance d'accroissement de la végétation alluviale avec une augmentation de 50 % de la strate arborée. Toutefois, de nombreuses trouées existantes en 2020 ne montrent pas de signes de fermeture en cours. Les explications possibles incluent des obstacles au développement de la strate arbustive nécessaire à la régénération des trouées, ou bien, selon le modèle de Duke (2001) (voir partie 4.2.1), ces trouées semblent être au même stade post-perturbation, suggérant une génération simultanée, et une régénération commune.

À l'exception d'un secteur confronté à des pressions anthropiques directe, l'analyse spatiale de la station d'étude a pu démontrer unanimement des tendances à la fermeture des trouées. Cette observation répond à la question scientifique : « quelles sont les dynamiques d'évolution de la végétation arborée dans la plaine alluviale de la Loire entre 2003 et 2020 ? »

Des changements ont donc significativement lieu sur les trouées de la station et sont confortés par le test de « Mann et Withney ». Le nombre et la surface des trouées ont diminués entre 2003 et 2020, cette évolution se manifeste à la fois sur les rives mais également sur les îles végétalisées de la Loire. Des liens ont pu être émis entre le phénomène d'incision du cours d'eau et le développement de la strate arborée sur un secteur en particulier. Des corrélations sont plus difficiles à élaborer pour les dynamiques de la strate arborée sur les îles végétalisées. Néanmoins, l'implication du changement climatique sur la modification des régimes

hydriques sur la Loire peut constituer une piste de recherche pour une future étude. Pour certaines trouées toujours présentes en 2020, les dynamiques d'évolution semblent ralenties avec une strate arbustive qui tarde à apparaître. L'occupation du sol de ces trouées reste une strate herbacée ce qui pourrait témoigner la présence de facteur limitant pour le développement de la strate arbustive. Eventuellement, des recherches pourraient être menées sur ces emplacements afin d'étudier l'accessibilité des ressources en eau, possiblement influencée par l'incision et le changement climatique.

Pour terminer, il est possible d'attester que l'outil LiDAR est un outil révolutionnaire concernant l'étude des dynamiques de végétation. Plus spécifiquement, la méthode des acquisitions multi-temporelles est très pertinente pour évaluer les dynamiques de végétation arborée. Cependant, il a été observé que la temporalité séparant les deux jeux de données utilisés était trop importante, et ne permettait pas d'attester de l'exactitude des évolutions observées. De plus, **Duke (2001)** estime un temps moyen de fermeture des trouées de végétation arborée à 10ans. Pour une étude ultérieure, il serait donc plus pertinent de travailler avec des données multi-temporelles dont l'écart est inférieur à ce laps de temps. Également, la méthode

utilisée des trouées de végétation a prouvé son efficacité pour permettre l'émergence de tendances de dynamiques d'évolution de la végétation arborée. Cependant, cette méthode ne permet pas une analyse exhaustive de ces dynamiques. Un couplage avec d'autres sources d'informations, telles que des données terrain, pourrait permettre une exhaustivité supérieure et détecter par exemple les mortalités n'engendrant pas des trouées.

Bibliographie et Sitographie

- [1] - Brokaw, N. V. L. (1982). The Definition of Treefall Gap and Its Effect on Measures of Forest Dynamics. *Biotropica*, 14(2), 158-160. <https://doi.org/10.2307/2387750>
- [2] - Chao, K.-J., Phillips, O. L., Monteagudo, A., Torres-Lezama, A., & Martínez, R. V. (2009). How Do Trees Die? Mode of Death in Northern Amazonia. *Journal of Vegetation Science*, 20(2), 260-268.
Complete themes—Ggtheme. (s. d.). Consulté 10 décembre 2023, à l'adresse <https://ggplot2.tidyverse.org/reference/ggtheme.html>
- [3] - Dalagnol, R., Phillips, O. L., Gloor, E., Galvão, L. S., Wagner, F. H., Locks, C. J., & Aragão, L. E. O. C. (2019). Quantifying Canopy Tree Loss and Gap Recovery in Tropical Forests under Low-Intensity Logging Using VHR Satellite Imagery and Airborne LiDAR. *Remote Sensing*, 11(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs11070817>
- [4] - Dalagnol, R., Wagner, F. H., Galvão, L. S., Streher, A. S., Phillips, O. L., Gloor, E., Pugh, T. A. M., Ometto, J. P. H. B., & Aragão, L. E. O. C. (2021). Large-scale variations in the dynamics of Amazon forest canopy gaps from airborne lidar data and opportunities for tree mortality estimates. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80809-w>
- [5] - De Toledo, J. J., Magnusson, W. E., Castilho, C. V., & Nascimento, H. E. M. (2012). Tree mode of death in Central Amazonia : Effects of soil and topography on tree mortality associated with storm disturbances. *Forest Ecology and Management*, 263, 253-261. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.09.017>
- [6] - Duke, N. C. (2001). Gap creation and regenerative processes driving diversity and structure of mangrove ecosystems. *Wetlands Ecology and Management*, 9(3), 267-279. <https://doi.org/10.1023/A:1011121109886>
- [7] - Eg, K. (s. d.). *What is a tree? – Definition, anatomy and characteristics*. EcoTree. Consulté 27 décembre 2023, à l'adresse <https://ecotree.green/en/blog/what-is-a-tree>
- [8] - Ertel, J., Goldman, L., Spore, J., & Brandt, J. (2023, juin 6). *Tree Cover Data Sets on Global Forest Watch, Explained* | GFW Blog. Global Forest Watch Content. <https://www.globalforestwatch.org/blog/data-and-research/tree-cover-data-comparison>
- [9] - Espírito-Santo, F., Keller, M., Linder, E., Oliveira Junior, R., Pereira, C., & Oliveira, C. (2013). Gap Formation and Carbon Cycling in the Brazilian Amazon : Measurement Using High Resolution Optical Remote Sensing and Studies in Large Forest Plots. *Plant Ecology and Diversity*, 7. <https://doi.org/10.1080/17550874.2013.795629>
- [10] - Esquivel-Muelbert, A., Phillips, O. L., Brien, R. J. W., Fauset, S., Sullivan, M. J. P., Baker, T. R., Chao, K.-J., Feldpausch, T. R., Gloor, E., Higuchi, N., Houwing-Duistermaat, J., Lloyd, J., Liu, H., Malhi, Y., Marimon, B., Marimon Junior, B. H., Monteagudo-Mendoza, A., Poorter, L., Silveira, M., ... Galbraith, D. (2020). Tree mode of death and mortality risk factors across Amazon forests. *Nature Communications*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18996-3>
- [11] - Hartshorn, G. (1978). *Tree falls and tropical forest dynamics* (p. 617-638).
- [12] - Hefley, H. M. (1937). Ecological Studies on the Canadian River Floodplain in Cleveland County, Oklahoma. *Ecological Monographs*, 7(3), 345-402. <https://doi.org/10.2307/1943055>
- [13] - Hunter, M. O., Keller, M., Morton, D., Cook, B., Lefsky, M., Ducey, M., Saleska, S., Jr, R. C. de O., & Schiatti, J. (2015). Structural Dynamics of Tropical Moist Forest Gaps. *PLOS ONE*, 10(7), e0132144. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132144>
- [14] - Kellner, J. R., & Asner, G. P. (2009). Convergent structural responses of tropical forests to diverse disturbance regimes. *Ecology Letters*, 12(9), 887-897. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01345.x>

- [15] - Magnabosco Marra, D., Trumbore, S. E., Higuchi, N., Ribeiro, G. H. P. M., Negrón-Juárez, R. I., Holzwarth, F., Rifai, S. W., dos Santos, J., Lima, A. J. N., Kinupp, V. F., Chambers, J. Q., & Wirth, C. (2018). Windthrows control biomass patterns and functional composition of Amazon forests. *Global Change Biology*, 24(12), 5867-5881. <https://doi.org/10.1111/gcb.14457>
- [16] - Muscolo, A., Bagnato, S., Sidari, M., & Mercurio, R. (2014). A review of the roles of forest canopy gaps. *Journal of Forestry Research*, 25(4), 725-736. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0521-7>
- [17] - Oliver, C., & Larson, B. (1996). *Forest Stand Dynamics*. Wiley.
- [18] - Rifai, S. W., Urquiza Muñoz, J. D., Negrón-Juárez, R. I., Ramírez Arévalo, F. R., Tello-Espinoza, R., Vanderwel, M. C., Lichstein, J. W., Chambers, J. Q., & Bohlman, S. A. (2016). Landscape-scale consequences of differential tree mortality from catastrophic wind disturbance in the Amazon. *Ecological Applications*, 26(7), 2225-2237. <https://doi.org/10.1002/eap.1368>
- [19] - Whitmore, T. C. (1989). Canopy Gaps and the Two Major Groups of Forest Trees. *Ecology*, 70(3), 536-538. <https://doi.org/10.2307/1940195>
- [20] - Zhang, K. (2008). Identification of gaps in mangrove forests with airborne LIDAR. *Remote Sensing of Environment*, 112(5), 2309-2325. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.10.003>
- [21] - Géoportail. <https://www.geoportail.gouv.fr/carte>
- [22] - Hydroportail (eauFrance). <https://www.hydro.eaufrance.fr>
- [23] - Les cartes de végétation (DREAL Centre-Val de Loire). <https://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/les-cartes-de-vegetation-r1920.html>

Table des figures

Figure 1 : Caractéristiques de la station Bois Gibault - Tracy-sur-Loire (58150).....	9
Figure 2 : Transect de végétation avant (A) et après (B) la normalisation des hauteurs de végétation pour les données de 2020.....	11
Figure 3 : Exemple de rasterisation d'un nuage de points	12
Figure 4 : Nombres de voisins de chaque point du nuage de 2003 selon les sphères de rayon 0.5m (A), 1.0m (B), 1.5m (C) et 2.0m (D).....	13
Figure 5 : Schéma de l'itération utilisée pour l'attribution des valeurs (en jaune) d'occupation du sol des trouées	16
Figure 6 : Récapitulatif de l'itération du champ "Etat" des trouées	18
Figure 7 : Processus d'étude spatiale de la valeur "Etat" des trouée.....	18
Figure 8 : Distribution des valeurs de surface de trouée en 2003.....	20
Figure 9 : Distribution des valeurs de surface de trouée en 2020.....	20
Figure 10 : Histogramme des occupations du sol des trouées de 2003 et 2020	21
Figure 11 : Diagramme de VENN des valeurs d'Etat" des trouées de 2003 et 2020.....	21
Figure 12 : Zones identifiées par des dynamiques d'évolution marquée de strate arborée entre 2003 et 2020	22
Figure 13 : Exemple de trouées de 2003 non visibles sur une ortho-photo de la même année	25
Figure 14 : Secteur 1 - rive droite.....	27
Figure 15 : Secteur 2 - rive droite.....	27
Figure 16 : Ortho photos établissant la présence d'un chenal multiple, photo droite été 1949, photo gauche hiver 1957 (source : géoportail)	28
Figure 17 : Ortho photos justifiant la fermeture du chenal multiple, photo droite hivers 2020, photo gauche été 2023 (source : géoportail).....	28
Figure 18 : Secteur 3 - les îles végétalisées	28
Figure 19 : Débit instantané maximal mensuel - La Loire à Saint-Satur – 2003 à 2023 (source : Hydroportail)	29
Figure 20 : Secteur 4 - proximité dans anciennes gravières	29
Figure 21 : Extraction de granulats dans le lit majeur de la station en 1990 (source : géoportail)	
Figure 22 : Exemple d'erreur d'intersection entre plusieurs entités raster	30

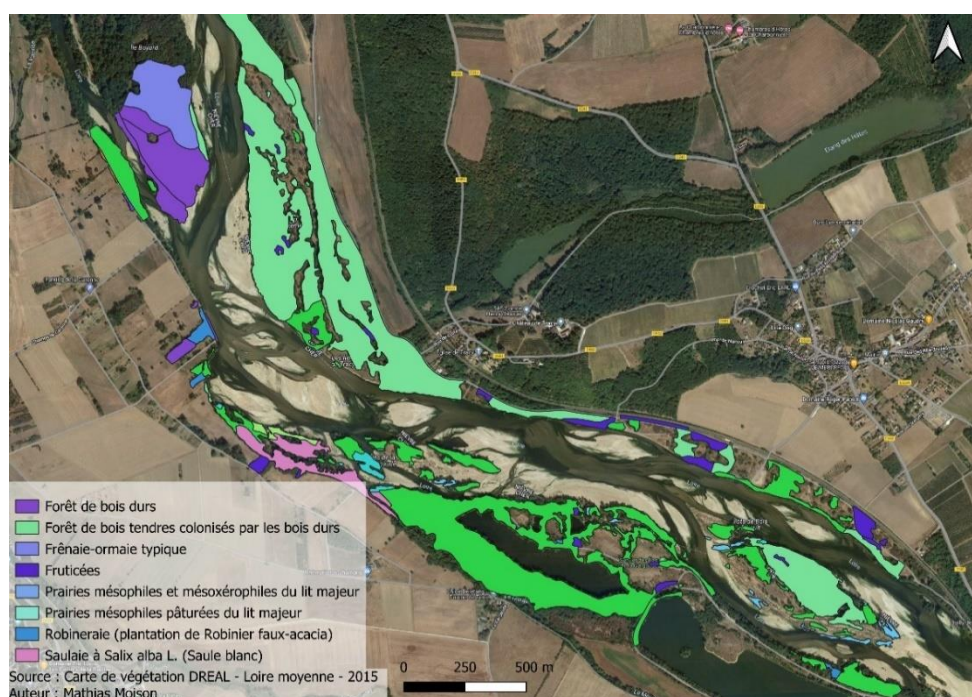
Table des tableaux

Tableau 1 : Surface en hectare de la strate arborée pour 2003 et 2020	19
Tableau 2 : Nombre de trouées de la strate arborée en 2003 et 2020.....	19

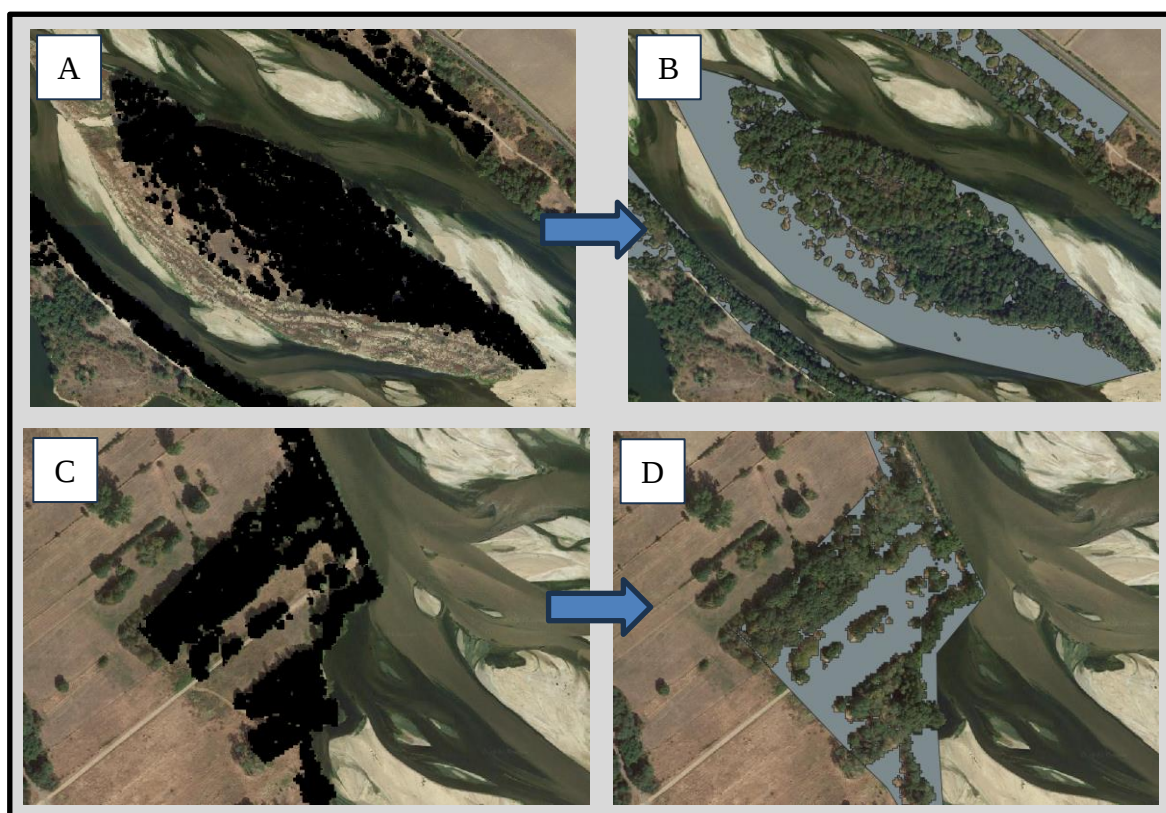
Table des Annexes

Annexe 1: Carte de végétation de la zone d'étude de Bois Gibault (Source : DREAL)	36
Annexe 2: Identification des trouées de végétation (B et D) sur deux zones du site d'étude, à partir du raster de strate arborée (A et C).....	36
Annexe 3: Arbre de choix des tests statistiques et fonctions de R	37
Annexe 4: Box plot des surfaces de trouées de 2003 sans échelle logarithmique.....	37
Annexe 5: Résultat du test statistique de Mann & Whitney sur les données de surface de 2003 et 2020 (source : XLSTAT)	38
Annexe 6: Graphique histogramme de la répartition des surfaces des trouées de 2003.....	38
Annexe 7: Graphique histogramme de la répartition des surfaces des trouées de 2020.....	39
Annexe 8 : Script R utilisé.....	41

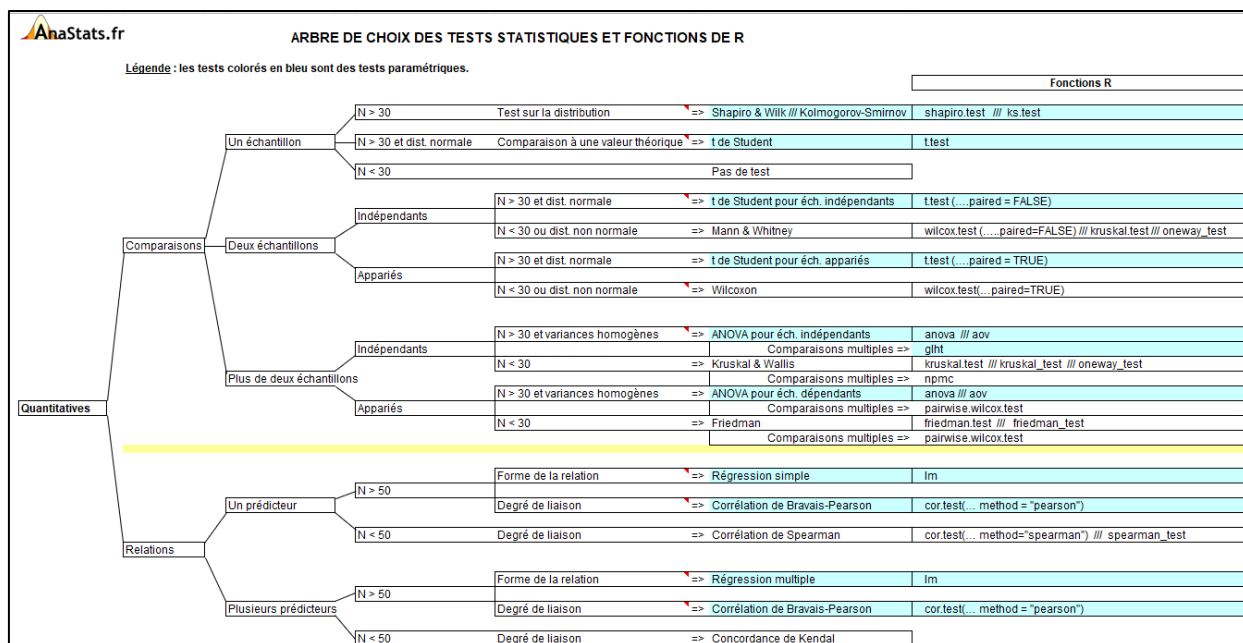
Annexes



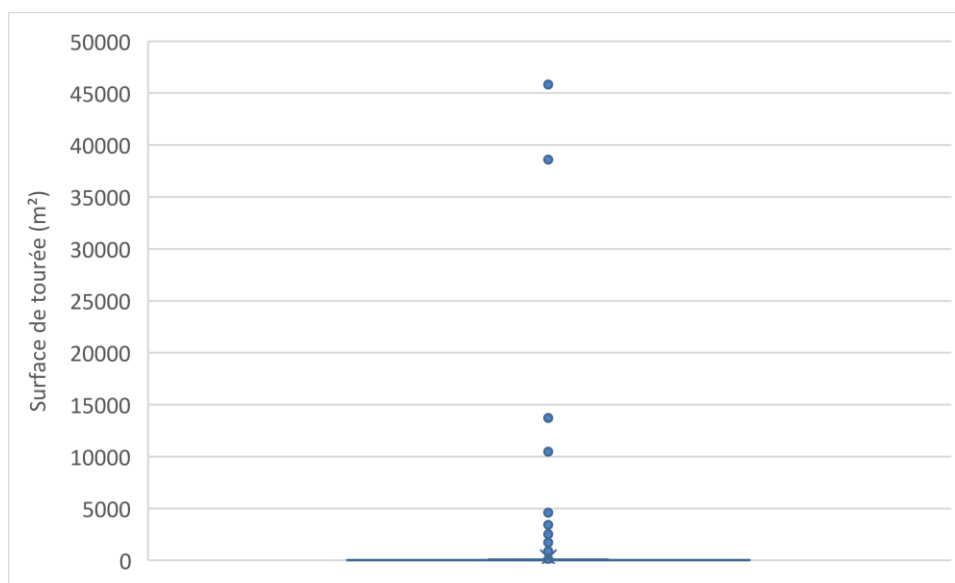
Annexe 1: Carte de végétation de la zone d'étude de Bois Gibault (Source : DREAL)



Annexe 2: Identification des trouées de végétation (B et D) sur deux zones du site d'étude, à partir du raster de strate arborée (A et C).



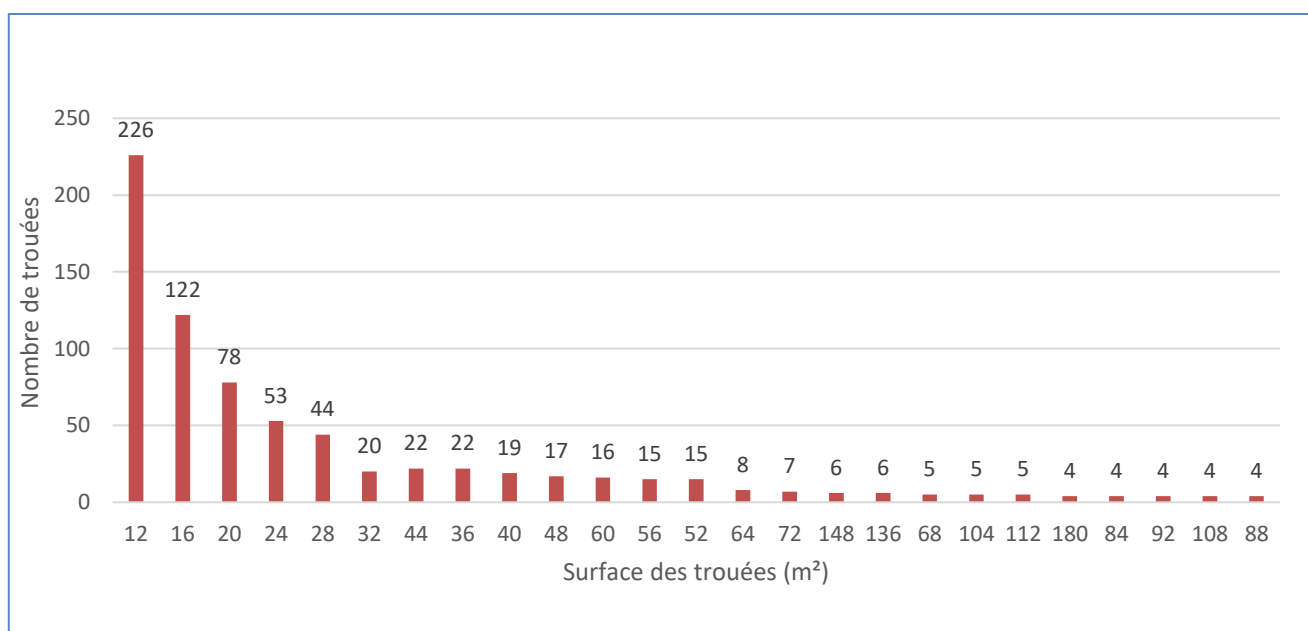
Annexe 3: Arbre de choix des tests statistiques et fonctions de R



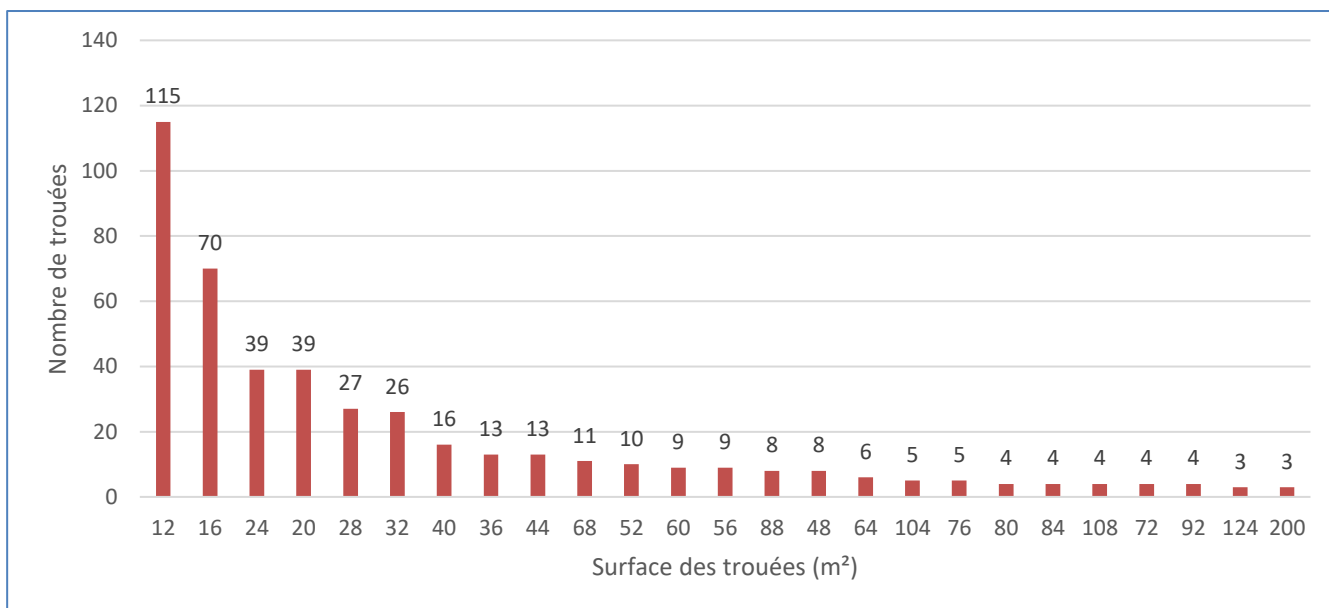
Annexe 4: Box plot des surfaces de trouées de 2003 sans échelle logarithmique

Statistiques descriptives :							
Variable	Observations	Obs. avec données manquantes	Obs. sans données manquantes	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
S1	878	0	878	10.740	45831.232	245.766	2170.676
Var1	548	0	548	12.020	17320.506	133.726	794.797
Test de Mann-Whitney / Test bilatéral :							
U	219711.500						
U (normalisé)	-2.773						
Espérance	240572						
Variance (U)	#####						
p-value (bilat)	0.006						
alpha	0.05						
La p-value exacte n'a pas pu être calculée. Une approximation a été utilisée pour calculer la p-value.							
Interprétation du test :							
H0 : La différence de position des échantillons est égale à 0.							
Ha : La différence de position des échantillons est différente de 0.							
Etant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha=0.05, on doit rejeter l'hypothèse nulle H0, et retenir l'hypothèse alternative Ha.							
Des ex-aequo ont été détectés et les corrections appropriées ont été appliquées.							

Annexe 5: Résultat du test statistique de Mann & Whitney sur les données de surface de 2003 et 2020 (source : XLSTAT)



Annexe 6: Graphique histogramme de la répartition des surfaces des trouées de 2003



Annexe 7: Graphique histogramme de la répartition des surfaces des trouées de 2020

```

1 install.packages("")
2
3 library(lidR)
4 library(ggplot2)
5 library(raster)
6 library(gstat)
7 library(ggpubr)
8 library(scales)
9 library(sf)
10 library(rstatix)
11
12 #Insérer les accès aux nuages de points
13 LdR_2020 <- readLAS("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/2_LAS_filtered/LdR_2020_norm.las")
14 LdR_2003 <- readLAS("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/2_LAS_filtered/LdR_2003_norm.las")
15
16 #On vérifie les erreurs
17 las_check(LdR_2003) #vérifie l'intégrité de nos nuages, si il n'y a pas de points doublés, etc. important pour éviter les erreurs bêtes.
18 las_check(LdR_2020)
19
20 # Des points dupliqués sont détecter. Il faut les retirer.
21 LdR_2003_dup <- filter_duplicates(LdR_2003) #Retire les points dupliqués
22 LdR_2020_dup <- filter_duplicates(LdR_2020)
23
24
25 #NORMALISATION DES DONNEES
26
27 #suppression de la topz, pour mise de tous les arbres à la même hauteur de base.
28
29 #Pour 2020, les points de sol sont directement dedans
30 LdR_2020_norm = normalize_height(LdR_2020_dup, tin())
31
32 #Pour 2003, ils n'y sont pas. On applique un DTM
33 DTM_2003_ras <- raster("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/4_Raster/DTM/DTM2003Raste2_2.tif") #Charger le DTM de 2003
34 plot(DTM_2003_ras, col = gray(1:50/50)) # On visualise le DTM
35 LdR_2003_norm = normalize_height(LdR_2003_dup, tin(), dtm = DTM_2003_ras) #On normalise le nuage de points grâce au DTM
36
37 #FILTRAGE DES DONNEES
38
39 #Sélection des strates
40 Arboree_2020 <- filter_poi(LdR_2020_norm, Z > 5) #Strate arborée, avec Z > 5m
41 Arbustive_2020 <- filter_poi(LdR_2020_norm, Z < 5 & Z > 1.5) #Strate arbustive, avec 1.5 < Z < 5m
42 Herbacee_2020 <- filter_poi(LdR_2020_norm, Z < 1.5 & Z > 0) #Strate herbacée, avec Z < 1.5m
43
44
45 #VISUALISATION DE TRANSECTS
46
47 #Transect 1, coordonnées T1(AB): Deux points d'extrémités dans le dossier "Transect Points", notés Transect 1.
48 A = c(693346, 6689648.9)
49 B = c(693071.7, 6689755.8)
50 #Transect 2, coordonnées T2(A2B2): Deux points d'extrémités dans le dossier "Transect Points", notés Transect 2.
51 A2 = c(692612.3, 6690334.4)
52 B2 = c(693246.5, 6689924.8)
53
54 #On crée la fonction de plot qu'on utilisera pour représenter les transects.
55 PlotTrans <- function(NomTransect) {
56   ggplot(NomTransect@data, aes(x = X, y = Z*2, color = Z)) + #On représente Z par rapport à Z, la légende est par rapport à Z. s
57   geom_point(size = 0.5) + #Taille des points.
58   coord_equal() + #Assure un scaling entre abscisse et ordonnée.
59   theme_gray() +
60   scale_color_gradientn(colours = height.colors(50))
61 }
62
63 #TRANSECTS
64 T1_2020 <- clip_transect(LdR_2020_norm, A, B, width = 4, xz = TRUE) #PREMIER TRANSECT : T1, pour 2020.
65 T1_2003 <- clip_transect(Str_Arb_2003, A, B, width = 4, xz = TRUE) #TROISIEME TRANSECT : T1, pour 2003
66 PlotTrans(T1_2020) #Visualisation du transect.
67
68
69 # Champ Occupation du sol des trouées
70 trouees_2020 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/Trouees 2020.shp")
71 trouees_2003 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/Trouees 2003.shp")
72
73 arbustive_2020 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/2020/arbustive_20_polygone.shp")
74 herbacee_2020 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/2020/herbacee_20_polygone.shp")
75
76 arbustive_2003 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/2003/arbustive_03_polygone.shp")
77 herbacee_2003 <- st_read("Z:/DEBRABANT_MOISON/BoisGibault/5_Format Shape/2003/herbacee_03_polygone.shp")
78
79 names(trouees_2020) #Afficher les champs
80
81 # Pour chaque trou, déterminer si il est plus rempli par ARBUSTES ou HERBE
82 for (i in 1:nrow(trouees_2020)) {
83   trou <- trouees_2020[i, ]
84
85   # Sélectionner les polygones d'ARBUSTES et HERBE qui intersectent le trou
86
87   arbustes_intersects <- st_intersection(arbustive_2020, trou)
88   herbe_intersects <- st_intersection(herbacee_2020, trou)
89
90   # Calculer la surface totale d'ARBUSTES et HERBE dans le trou
91
92   surface_arbustes <- sum(st_area(arbustes_intersects))
93   surface_herbe <- sum(st_area(herbe_intersects))
94   surface_vide <- st_area(trou) - (surface_herbe + surface_arbustes -sum(st_area(st_intersection(arbustes_intersects, herbe_intersects))))
95
96   # Mettre à jour la valeur du champ "OccSol" en fonction de la surface maximale
97
98   if (surface_vide > surface_herbe & surface_vide > surface_arbustes) {
99     trouees_2020[i, "OccSol"] <- "Nue"
100   } else if (surface_arbustes > surface_herbe) {
101     trouees_2020[i, "OccSol"] <- "Arbustive"
102   } else if (surface_herbe > surface_arbustes) {
103     trouees_2020[i, "OccSol"] <- "Herbacee"
104   } else if (surface_herbe == surface_arbustes) {
105     trouees_2020[i, "OccSol"] <- "Ar et Her"
106   } else {
107     trouees_2020[i, "OccSol"] <- NULL
108   }
109 }
110

```

```

111 for (i in 1:nrow(trouees_2003)) {
112   trou <- trouees_2003[i, ]
113
114   # Sélectionner les polygones d'ARBUSTES et HERBES qui intersectent le trou
115   arbustes_intersects <- st_intersection(arbustive_2003, trou)
116   herbe_intersects <- st_intersection(herbacee_2003, trou)
117
118   # Calculer la surface totale d'ARBUSTES et HERBES dans le trou
119   surface_arbustes <- sum(st_area(arbustes_intersects))
120   surface_herbe <- sum(st_area(herbe_intersects))
121   surface_vide <- st_area(trou) - (surface_herbe + surface_arbustes - sum(st_area(st_intersection(arbustes_intersects, herbe_intersects))))
122
123   # Mettre à jour la valeur du champ "OccSol" en fonction de la surface maximale
124   if (surface_vide > surface_herbe & surface_vide > surface_arbustes) {
125     trouees_2003[i, "OccSol"] <- "Nue"
126   } else if (surface_arbustes > surface_herbe) {
127     trouees_2003[i, "OccSol"] <- "Arbustive"
128   } else if (surface_herbe > surface_arbustes) {
129     trouees_2003[i, "OccSol"] <- "Herbacee"
130   } else if (surface_herbe == surface_arbustes) {
131     trouees_2003[i, "OccSol"] <- "Ar et Her"
132   } else {
133     trouees_2003[i, "OccSol"] <- NULL
134   }
135 }
136
137 # Attribution des valeurs du champ "Etat" pour 2003
138 for (i in 1:nrow(trouees_2003)) {
139   trou <- trouees_2003[i, ]
140
141   # Sélectionner les trouees de 2020 qui intersectent le trou de 2003
142   trouees20_intersection <- st_intersection(trouees_2020, trou)
143
144   # Changement de l'Etat selon les conditions
145   if (nrow(trouees20_intersection) == 0) { #Si pas de trouees à l'endroit de celle de 2003
146     trouees_2003[i, "Etat"] <- "Refermee"
147   }
148   else if (nrow(trouees20_intersection) == 1) { #Si exactement une trouée à l'endroit de celle de 2003
149     trou20Area <- floor(trouees20_intersection$Surface[1])
150     trou03Area <- floor(trou$Surface[1])
151
152     if (trou20Area > trou03Area) {
153       trouees_2003[i, "Etat"] <- "Aggrandie"
154     }
155
156     else if (trou20Area < trou03Area) {
157       trouees_2003[i, "Etat"] <- "Diminuee"
158     }
159
160     else if (trou20Area == trou03Area) {
161       trouees_2003[i, "Etat"] <- "Deplacee"
162     }
163   }
164   else if (nrow(trouees20_intersection) > 1) {
165     trouees_2003[i, "Etat"] <- "Divisee"
166   }
167   else {
168     trouees_2003[i, "Etat"] <- NULL
169   }
170 }
171
172 # Attribution des valeurs du champ "Etat" pour 2020
173 for (i in 1:nrow(trouees_2020)) {
174   trou <- trouees_2020[i, ]
175   trouees03_intersection <- st_intersection(trouees_2003, trou)
176
177   # Changement de l'Etat selon les conditions
178   if (nrow(trouees03_intersection) == 0) {
179     trouees_2020[i, "Etat"] <- "Nouvelle"
180   }
181   else if (nrow(trouees03_intersection) == 1) {
182     trou03Area <- floor(trouees03_intersection$Surface[1])
183     trou20Area <- floor(trou$Surface[1])
184
185     if (trou20Area > trou03Area) {
186       trouees_2020[i, "Etat"] <- "Aggrandie"
187     }
188
189     else if (trou20Area < trou03Area) {
190       trouees_2020[i, "Etat"] <- "Diminuee"
191     }
192
193     else if (trou20Area == trou03Area) {
194       trouees_2020[i, "Etat"] <- "Deplacee"
195     }
196   }
197   else if (nrow(trouees03_intersection) > 1) {
198     trouees_2020[i, "Etat"] <- "Fusionnee"
199   }
200   else {
201     trouees_2020[i, "Etat"] <- NULL
202   }
203 }
204
205 # Afficher les premières lignes de la couche TROUS mise à jour
206 head(trouees_2020)
207 st_write(Couche, "chemin") #Exportation des couches
208

```

Annexe 8 : Script R utilisé



Directeur de recherche :

Alex Andréault

Mathias Moison
Cédric Debrabant
PFE/DAE5
IMA
2023-2024

Etude des dynamiques de végétation forestières : caractérisation de la végétation arborée alluviale de la Loire moyenne entre 2003 et 2020.

Résumé :

La végétation alluviale joue un rôle crucial dans les écosystèmes fluviaux, offrant diverses fonctions socio-écologiques. Face à de multiples perturbations, principalement attribuables au changement climatique et à l'incision, une compréhension approfondie de l'évolution de cette végétation devient un enjeu contemporain majeur. Ce projet met en lumière les outils privilégiés, tels que l'acquisition multi-temporelle de LiDAR aéroporté ainsi que la méthode de l'analyse des trouées de canopée, pour caractériser les dynamiques de végétation arborée alluviale, notamment dans le cas spécifique de la Loire. En utilisant ces outils, certaines tendances d'évolution sont ressorties : l'étude quantitative révèle une diminution du nombre de trouées entre 2003 et 2020, bien que celles présentes soient de plus grandes tailles. Malgré une augmentation générale de la végétation alluviale, de nombreuses trouées existantes en 2020 ne montrent pas de signes de fermeture. Les explications possibles incluent des obstacles au développement de la strate arbustive nécessaire ou un stade post-perturbation similaire selon le modèle de **Duke (2001)**. À l'exception d'un secteur confronté à des pressions anthropiques directes, l'analyse spatiale de la station d'étude a pu démontrer unanimement des tendances à la fermeture des trouées. Des liens ont pu être émis entre le phénomène d'incision du cours d'eau et le développement de la strate arborée sur un secteur en particulier. Des corrélations sont plus difficiles à élaborées pour les dynamiques de la strate arborée sur les îles végétalisées. Néanmoins, l'implication du changement climatique sur la modification des régimes hydriques sur la Loire peut constituer une piste de recherche pour une future étude.

Enfin, bien que l'outil LiDAR soit révolutionnaire, la méthode des acquisitions multi-temporelles nécessite une temporalité plus courte. Également, un couplage avec d'autres sources d'informations, comme des données terrain, pourrait améliorer la détection de mortalités n'engendrant pas de trouées.

Mots Clés : Végétation, Mortalité, Trouée, LiDAR, Dynamique, Strate arborée, Plaine alluviale, Loire.